

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Davor Cesarec**

Zagreb, 07.07.2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Branko Bauer, dipl. ing.

Student:

Davor Cesarec

Zagreb, 07.07.2016. godina.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Branku Baueru na pruženoj stručnoj pomoći i korisnim savjetima pri analizi eksperimentalnog rada te izradi ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se djelatnicima Katedre za ljevarstvo na ukazanoj pažnji pri pokazivanju i demonstriranju za provedbu eksperimentalnog rada.

Zahvaljujem se svojim prijateljima i kolegama na strpljenju, pomoći i povjerenju koje su mi ukazali tijekom studija i tijekom izrade diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem svojim roditeljima i sestri na beskrajnoj podršci, koji su mi omogućili školovanje i potporu.

Zahvaljujem se svojoj djevojci Mariji koja mi je pružila neizmjernu potporu i poticaj u radu.

Davor Cesarec

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Davor Cesarec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DAVOR CESAREC**

Mat. br.: 0035171453

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**LIJEVANJE VILICE OD Al LEGURE KOKILNIM LIJEVOM**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**PERMANENT MOLD CASTING OF Al ALLOY FORK**

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je proučiti tehnologiju kokilnog lijevanja i prikupiti podatke o konstrukciji i izradi kalupa za lijevanje aluminijskih legura.

Za zadani odljevak, vilicu od aluminijske legure, potrebno je analizirati izgled CAD modela i kalupa sa sustavom ulijevanja i napajanja. Prikupiti podatke o postojećoj tehnologiji lijevanja, napraviti simulaciju u programskom paketu QuikCAST i usporediti dobivene rezultate sa stvarnim stanjem. Analizirati i optimizirati parametre lijevanja. Predložiti poboljšanja u postojećoj tehnologiji lijevanja.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadan:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

**SADRŽAJ:**

POPIS SLIKA: .....	IV
POPIS TABLICA: .....	VI
SAŽETAK: .....	VII
SUMMARY: .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. RAZVOJ LJEVARSTVA .....	3
3. PRIMJERI ODLJEVAKA KOKILNOG LIJEVA .....	6
3.1 Prednosti i nedostaci odljevaka kokilnog lijeva .....	7
4. MATERIJALI KOJI SE LIJEVAJU KOKILNIM LIJEVOM.....	8
4.1 Cink i njegove legure.....	8
4.2 Aluminij i njegove legure.....	8
4.3 Magnezij i njegove legure .....	9
5. TEHNOLOŠKI POSTUPAK PROIZVODNJE KOKILNOG LIJEVA .....	10
5.1 Premazivanje kalupa.....	10
5.2 Ulaganje pješčanih i metalnih jezgri .....	11
5.2.1 Metalne jezgre .....	11
5.2.2 Pješčane jezgre .....	12
5.3 Zatvaranje kalupa.....	13
5.3.1 Centriranje kalupa .....	13
5.3.2 Stezanje kalupa .....	13
5.4 Ulijevanje litine.....	14
5.4.1 Uljevni sustav .....	15
5.5 Hlađenje kalupa .....	16
5.6 Otvaranje kalupa i izbacivanje odljevka .....	17
6. IZVEDBE KALUPA ZA KOKILNI LIJEV .....	18

6.1 Ručni kalupi .....	18
6.2 Kalupna klupa .....	19
7. SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA .....	20
7.1 Nukleacija.....	21
7.1.1 Homogena nukleacija.....	21
7.1.2 Heterogena nukleacija .....	22
7.2 Rast kristala .....	23
8. SIMULACIJA LIJEVANJA .....	24
8.1 Počeci primjene programa za simulacije.....	24
8.2 Simulacija lijevanja .....	25
8.3 Koraci u simulaciji lijevanja .....	26
8.4 Simulacijski program.....	26
9. EKSPERIMENTALNI DIO .....	27
9.1 Snimanje krivulje hlađenja u odljevku .....	29
9.2 Snimanje krivulja hlađenja u kokili .....	32
9.3 Zagrijavanje kokile .....	36
9.4 Vrijeme skrućivanja karakterističnih mjesta odljevka .....	37
9.5 Tijek skrućivanja i pojava poroznosti skrućivanja .....	39
9.6 Priprema taljevine za lijevanje.....	44
9.7 Lijevanje vilice.....	46
9.8 Rezultati i analiza .....	50
9.8.1 Vizualna kontrola .....	50
9.8.2 Snimanje rendgenom.....	51
10. ZAKLJUČAK .....	53
LITERATURA.....	54

**POPIS SLIKA:**

Slika 1. Majstor, umjetnik oko 1395. godine [3] .....	3
Slika 2. Počeci mehanizirane proizvodnje početkom 20. st. ....	5
Slika 3. Primjeri odljevaka izrađenih kokilnim lijevom .....	6
Slika 4. Tehnološki postupak proizvodnje kokilnog lijeva [1] .....	10
Slika 5. Prikaz metalne jezgre u kalupu .....	11
Slika 6. Centriranje polovica kalupa [1] .....	13
Slika 7. Načini stezanja kalupa: lijevo – ručno; desno – automatizirano [1] .....	14
Slika 8. Uljevanje litine u zatvoreni kalup [1] .....	14
Slika 9. Uljevni sustav prema kriteriju uljevnice sile i položaja ušća [1] .....	15
Slika 10. Uljevni sustavi u odnosu na razdjelnicu [1] .....	15
Slika 11. Odljevak Al legure sa slomljenim spustom uljavnog sustava [2] .....	16
Slika 12. Izbacivač odljevka [2] .....	17
Slika 13. Ručni kalup za kokilno lijevanje [1] .....	18
Slika 14. Kokilna kalupna klupa [1] .....	19
Slika 15. Prikaz krivulje hlađenja čistog metala [6] .....	20
Slika 16. Faze skrućivanja: a) nukleacija kristala u taljevinu, b) i c) rast kristala, d) završeno skrućivanje [11] .....	21
Slika 17. Krivulja hlađenja čistog metala s pothlađenjem [8] .....	22
Slika 18. Heterogena nukleacija na stijenci kalupa: a) kritična veličina klice, b) gornja klica ne može rasti iz pukotine dok donja može .....	23
Slika 19. Simulacije lijevanja [12] .....	25
Slika 20. Vilica od aluminijske legure .....	27
Slika 21. 3D prikaz vilice .....	28
Slika 22. Nacrt vilice .....	28
Slika 23. Karakteristična mjesta odljevka za snimanje krivulja hlađenja .....	29
Slika 24. Krivulja hlađenja u odljevku, varijanta 640-200 .....	30
Slika 25. Krivulje hlađenja u odljevku, varijanta 640-300 .....	30
Slika 26. Krivulje hlađenja u odljevku, varijanta 720-200 .....	31
Slika 27. Krivulje hlađenja u odljevku, varijanta 720-300 .....	31
Slika 28. Maksimalno zagrijana jezgra, varijanta 640-200 .....	32
Slika 29. Temperaturno polje kokile i odljevka na kraju skrućivanja .....	32



Slika 30. Karakteristična mjesta gdje su snimane krivulje temperaturnih promjena u kokili (1-5) i odljevku (6).....	33
Slika 31. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 640-200.....	34
Slika 32. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 640-300.....	34
Slika 33. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 720-200.....	35
Slika 34. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 720-300.....	35
Slika 35. Histogram, maksimalne temperature kokile, °C .....	36
Slika 36. Vrijeme skrućivanja odljevka, varijanta 720-300 .....	37
Slika 37. Histogram, vrijeme srkućivanja karakterističnih mjesta u odljevku, s .....	38
Slika 38. Usmjereno skrućivanje prema pojilu, varijanta 720-300.....	39
Slika 39. Skrućivanje odljevka, udio krute faze nakon 1,59 s, varijanta 720-300.....	40
Slika 40. Završetak skrućivanja odljevka, varijanta 640-200 .....	40
Slika 41. Mjesta pojave poroznosti skrućivanja, varijanta 640-200 .....	41
Slika 42. Vjerojatnost pojave poroznosti na mjestima koja posljednja skrućuju, varijanta 640-200.....	42
Slika 43. Histogram, vjerojatnost poroznosti, % .....	43
Slika 44. Elektrootporna peć za taljenje .....	44
Slika 45. Taljenje aluminijskih ingota .....	44
Slika 46. Skidanje troske s površine taljvine.....	45
Slika 47. Mjerenje temperature taljevine.....	45
Slika 48. Kokilni stroj za lijevanje, otvoren kalup.....	46
Slika 49. Mehanizam sa otvaranje i zatvaranje kokile, zatvoren kalup .....	46
Slika 50. Pomična polovica kokile s jezgrama .....	47
Slika 51. Nepomična polovica kokile .....	47
Slika 52. Nanošenje premaza na kokilu .....	48
Slika 53. Ulijevanje taljevine .....	48
Slika 54. Otvaranje kokile nakon lijevanja.....	49
Slika 55. Vađenje odljevka nakon hlađenja .....	49
Slika 56. Prvi odljevak, lijevanje u kokilu predgrijanu na 150 °C.....	50
Slika 57. Uljevni sustav .....	51
Slika 58. Rendgenska snimka odljevaka .....	52
Slika 59. Prvi odljevak- hladniji kalup (lijevo) i topliji kalup (desno) .....	52

**POPIS TABLICA:**

Tablica 1. Grupe po kriteriju temperatura lijevanja i temperature predgrijavanja kokile .....	27
Tablica 2. Maksimalna temperatura kokile, °C .....	36
Tablica 3. Vrijeme skrućivanja karakterističnih mjesta odljevka u sekundama .....	37
Tablica 4. Vjerojatnost poroznosti, % .....	43

**SAŽETAK:**

Predmet razmatranja rada je tehnologija kokilnog lijevanja, razvoj kokilnog lijevanja kroz povijest uključujući faze automatizacije u prošlosti, sadašnjosti i budućnosti. U radu je navedena problematika lijevanja u metalne kalupe (kokile), tehnološki postupak lijevanja te prednosti i nedostaci lijevanja u kokile. Detaljnije je opisan tehnološki postupak lijevanja, uključujući pripremanje kalupa, ulaganje jezgri, zatvaranje kalupa, lijevanje, hlađenje te vađenje odljevka.

Napravljen je kratki osvrt o skrućivanju materijala nakon lijevanja što je jedna od najvažnijih pojava u izradi proizvoda lijevanjem. Opisane su računalne simulacije kao naophodan alat u industriji i proizvodnji. Eksperimentalni dio temelji se na simulaciji lijevanja izvedenoj u softverskom programu ProCAST i skrućivanja u programu QuickCAST, analizirani su rezultati računalne simulacije. Rezultati simulacije su uspoređeni sa stvarnim stanjem odljevka odlivenim u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Ključne riječi: kokilni lijav, lijevanje Al-legura, simulacija lijevanja

**SUMMARY:**

This thesis deals with the technology of permanent mold die casting, its development throughout history, and past, present and future phases of casting automation. The paper lists issues when casting in metal molds (dies), and procedure's advantages and disadvantages. Furthermore, the whole technological process of casting is described in detail with steps such as: mold preparation, core insertion, mold closing, casting, cooling and removal of the casting.

Additionally, paper gives a brief review of material solidification as one of the most important phenomena in casting. Computer simulations have nowadays become a necessary tool in both industrial design and manufacturing; therefore the experimental part of the thesis is based on casting simulations executed in ProCAST and QuikCAST software package. The results of computer simulations were then analyzed and compared with the actual castings produced in foundry the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture.

Key words: permanent mold casting, casting of Al-alloy, casting simulation

## 1. UVOD

Kokilnim lijevom naziva se postupak lijevanja odljevaka u metalne kalupe ili kokile kada se litina ulijeva djelovanjem gravitacije. Upravo zbog načina lijevanja, kokilni lijev se naziva i gravitacijski lijev. Vanjski dio odljevka određen je kalupnom šupljinom, a šupljine u odljevku oblikuju se pomoću pješčanih ili metalnih jezgri.

Budući da se lijevanje vrši u metalne kalupe, to ustvari predstavlja lijevanje u višekratne kalupe to jest u kalup se više puta može uljevati litina. Nakon skrućivanja litine kalup se otvara te se iz njega izvlači ili izbacuje odljevak. Zatim slijedi novi ciklus, zatvaranje kalupa i ponovno ulijevanje litine.

Kalupi se izrađuju od čelika ili sivog lijeva odgovarajućeg kemijskog sastava, a oblikuju se obično lijevanjem ili strojnom obradom. Strojnom obradom i poliranjem može se postići jako fina obrađena površina i točne dimenzije kalupa.

Osim dvodijelnih kalupa u upotrebi su složeni višedijelni kalupi primjenjivi za složenije obratke kao npr. u autoindustriji. Vijek trajanja kalupa je od desetak tisuća do nekoliko stotina tisuća lijevanja. [1]

Lijevanje je najekonomičniji način proizvodnje (npr. za velika kućišta strojeva kompliciranih oblika), a posebno onda kada niti jedna druga tehnologija ne omogućava gotov proizvod poput dijelova sa unutrašnjim kanalima nepravilnog oblika. Za proizvodnju dijelova kompliciranih oblika u serijskoj proizvodnji, lijevanje je ekonomičnije od ostalih postupaka. Oblikovanje se vrši u tekućem stanju, a metal (litina), kao i sve tekućine, zahtjeva minimalni utrošak energije za promjenu oblika, pogotovo jer se kao uljevna sila najčešće koristi sila gravitacije.

Utrošak energije za dobivanje konačnog proizvoda ipak je znatan jer materijal prethodno treba rastaliti. To je jedan od razloga zašto je lijevanje nezamjenjiva tehnologija kod izrade proizvoda složenih oblika. Lijevanje nam omogućuje iznimno visoku proizvodnost zbog kratkog trajanja skrućivanja odljevaka. Litina za vrijeme ulijevanja, skrućivanja i ohlađivanja na kalup djeluje mehanički, kemijski i toplinski. Za izradu kvalitetnih odljevaka potrebna je visoka razina znanja i umještosti. Naime čitav proces nije moguće vizualno pratiti jer se odljevak formira unutar zatvorenog kalupa. Upravljanje kvalitetom iznimno je složeno jer sam proces skrućivanja litine i promjene agregatnog stanja nije dovoljno istražen. Neki od

zahtjeva su mehanička i dimenzijska svojstva odljevaka te neki drugi posebni zahtjevi. Proces lijevanja je kontinuiran, pa ga je teško u cijelosti kontrolirati, što ga svrstava u rizične tehnologije. To je razlog zašto se razvoj ljevarstva kreće u smanjenju rizika i iskorištenju mogućnosti visoke proizvodnje.

## 2. RAZVOJ LJEVARSTVA

Nakon što je čovjek otkrio metale, izradio peći za teljenje te pronašao prikladne materijale za izradu kalupa, lijevanje metala postalo je moguće. Najstariji materijal koji se oblikovao lijevanjem je bakar. Lijevanje bakra počelo je u trećem tisućljeću prije naše ere. Kako bakar ima loša ljevačka svojstva (visoko talište te sklonost otapanju plinova) ukazala se potreba za drugim materijalima. To je bila ljevačka bronca, kao znatno pogodniji ljevački materijal. Tehnologija lijevanja bronce osobito se razvila u starom vijeku. Iz toga vremena potječu mnogi upotrebn i umjetnički brončani odljevci. Topovske cijevi te različita oružja i oruđa i drugi predmeti lijevali su se od bronce u srednjem vijeku. Osim tehnike lijevanja bronce razvila se i tehnika lijevanja mjedi, u sredozemnom kulturnom području. Mjed je slitina bakra sa cinkom. Od mjedi su se proizvodili najčešće ukrasni predmeti, te se kasnije počela primjenjivati u strojogradnji. [2]



Slika 1. Majstor, umjetnik oko 1395. godine [3]

Kinezi su prije naše ere lijevali odljevke od sivog lijeva dok je u Europi proizvodnja počela tek u srednjem vijeku. Proizvodnja čeličnog lijeva nije bila moguća premda je čelik bio poznat već od ranije. Ugljena gnjecava željezna masa, tzv. Nado dobivala se izravno iz rude ispod vatre u ognjištima i niskim jamskim pećima. Ta masa se kasnije kovala. Tek većom dobavom zraka u jamskim pećima (zbog izgaranja) dobivena je litina na bazi željeza. Puhala na mehanički pogon vodom ili parom zamijenila su prirodni propuh i ručno puhalo. Na taj

način omogućena je proizvodnja sivog lijeva. Usporedno morali su se poboljšati i materijali za izradu kalupa da bi odolijevali višim temperaturama lijevanja.

U 15.st. pojavljuju se prvi odljevci od sivoga lijeva u obliku topovskih kugli. Izumom peći za taljenje sirovog željeza tj. kad se taljevina nije više ulijevala u kalupe neposredno iz peći za taljenje rude počinje novo razdoblje u lijevanju sivog lijeva. Plamene peći koristile su se u 17. i 18. st., a krajem 19.st. kupolne peći (kupolke) u kojima je ljevač mogao taliti sirovo željezo, lomljevinu, željezne otpatke i drugo. Mijenjanjem pojedinih komponenti zasipa ljevač je mogao podesiti sastav taljevine te na taj način više nije bio ovisan o sirovom željezu iz visoke peći. [2]

Žarenje odljevaka bilo je poznato početkom 17. st. Žarenjem odljevaka bijelog lijeva, koji je tvrd, krhak i neobradiv, dobivali su se žilavi odljevci. Tada je počela proizvodnja tvrdog lijeva i lijeva za izradu valjaka. Danas se u svrhu taljenja čeličnog lijeva koriste električne peći. Nekada se čelični lijev talio u grafitnim loncima. Izrada kalupa za takvo taljenje stvarala je određene poteškoće. [2]

Nakon zastoja koji je pratio sve djelatnosti u prvoj polovici srednjeg vijeka, duhovna renesansa značila je i proizvodnju pa ljevarstvo daje proizvode interesantne za javne, državne i crkvene potrebe. Ljevarstvo je tehnologija namijenjena velikom broju korisnika, zbog mogućnosti izrade velikog broja replika pomoću modela. Do kraja 19.st. ljevarstvo je bila individualna proizvodnja gdje je dominirao jedan majstor. Sve do kraja 20.st. ljevarstvo se neće osloboditi veze pojedinac-majstor-inženjer. [2]

Problem mehaničke energije razriješen je industrijskom revolucijom. Pogodnost ljevarstva za serijsku proizvodnju doći će do izražaja naglim porastom populacije. Intenzivna mehanizacija, uglavnom na mehaničkim principima, dovest će do povećanja proizvodnosti, ali i do vrlo teških radnih uvjeta, prašine, buke i povišene temperature. Efikasna industrijska kontrola kvalitete nije moguća zbog nedostatka neadekvatnih instrumenata premda su odljevci iznimno dobri, a temeljna saznanja o metalurgiji su formulirana. Početkom 20.st. došlo se do saznanja da je proizvodnju bolje temeljiti na visokosofisticiranim strojevima nego na visokvalificiranim radnicima-majstorima. Slika 2 prikazuje primjer ljevaonica početkom 20. st. Stručna snaga potrebna je u pripremi proizvodnje, alatnici i održavanju. Ovakvim načinom došlo je do visoke mehanizacije proizvodnih linija baziranih na treskalicama. Kemijska energija još uvijek se primarno koristi za taljenje, bez obzira na široku upotrebu električne energije. [4]





Slika 2. Počeci mehanizirane proizvodnje početkom 20. st.

Zbog sve većeg pritiska u vidu ujednačene kvalitete, visoke dimenzijske točnosti, radnih uvjeta i ekoloških uvjeta većina ljevaonica nije bila u mogućnosti pratiti taj ritam. Zarada je bila nemoguća te dolazi do propadanja ljevaonica sredinom 20.st. Zadovoljavajuća rješenja nisu postiziva zbog tehničkih uvjeta koji vladaju u ljevaonicama. S obzirom na nemogućnost prilagodbe starih, grade se nove, moderne ljevaonice. Treskalica je izbačena zbog ograničenja uzrokovanih bukom, a zamjena dolazi u obliku visokotlačne automatske pritiskalice iznimno visoke proizvodnosti.

### 3. PRIMJERI ODLJEVAKA KOKILNOG LIJEVA

Različiti odljevci proizvedeni postupkom kokilnog lijeva prikazani su na slici 3. Lijevanjem npr. aluminijskih legura u kalupe mogu se proizvesti dijelovi za vozila svih vrsta, cijevni elementi, kućišta različitih strojeva i naprava, proizvodi za dekorativne svrhe kao npr. ograde, drške, stupići, ukrasni predmeti za unutrašnjost automobila. Na slici 3 prikazano je nekoliko primjera odljevaka od kokilnog lijeva. [5]



Slika 3. Primjeri odljevaka izrađenih kokilnim lijevom

### 3.1 Prednosti i nedostaci odljevaka kokilnog lijeva

Prednosti:

- Odljevci imaju glatku i čistu površinu te točne dimenzije
- Odljevci imaju gustu strukturu i dobra mehanička svojstva
- Struktura odljevaka je sitnozrnata, a čvrstoća odljeva je velika
- Proizvodni prostor ljevaonice bolje je iskorišten jer otpada prostor potreban za pripremu, transport, usklađivanje pijeska te prostor za čišćenje odljevaka
- Mogućnost lijevanja svih najvažnijih legura od čelika, sivog lijeva, bakra, aluminijskog cinka i dr.
- Kratak ciklus izrade odljevaka
- Višekratno lijevanje odljevaka s jednim setom kalupa
- Dobra toplinska vodljivost metalnog kalupa
- Odljevci su bez uključina pijeska (osim ako se koriste piješčane jezgre) [1]

Nedostaci:

- Veličina odljevka ograničena je mogućnošću izrade kokile, njenom termostabilnošću i visokom cijenom izrade
- Visoki troškovi izrade kalupa, zato se kokilno lijevanje koristi za velikoserijsku proizvodnju
- Zbog potrebe vađenja odljevka iz kalupa, sloboda konstruiranja odljevka je ograničena
- Napajanje odljevka je otežano zbog relativno hladne litine u pojilu
- Održavanje kalupa utječe na njegovu izdržljivost, potrebno je premazivanje grafitom, glinicom ili čađom
- Potrebno je izbjegavati izdanke i oštre rubove na kalupu [1]

## **4. MATERIJALI KOJI SE LIJEVAJU KOKILNIM LIJEVOM**

Kokilnim lijevom lijevaju se: legure bakra, aluminija, magnezija i cinka. Najčešće se ipak lijevaju odljevci od lako taljivih metala kao što su cink i njegove legure, legure aluminija i legure magnezija.

### **4.1 Cink i njegove legure**

Razvojem cinka i njegovih legura došlo je do grupa legura koje su pogodne za lijevanje u pijesak, metalne kalupe ili kokile i za školjkasti lijev. Mehanička svojstva ovih legura mogu biti kao zamjena za željezni lijev i za bakrene legure. Pošto je cink u cijeni povoljniji od bakra, njegove legure imaju značajnu prednost pred bakrenim legurama. Dobra cinkova obradivost i otpornost na koroziju čine ga zanimljivijim od bakra. Cinkove legure lijevane u kalup imaju dobra mehanička svojstva. Zbog njihovog niskog tališta (420 °C) i temperature lijevanja, utrošak energije je nizak. Odljevci od cinkovih legura danas se uspješno lijevaju s debljinom stijenke od 2,5 mm. Pri lijevanju većih debljina stijenke preporuča se koristiti legure s 12 % aluminija. Legure s 27% aluminija upotrebljavaju se kada se zahtijevaju bolja mehanička svojstva kod tankostijenih obradaka.

Cinkove legure upotrebljavaju se kada se od odljevaka traže bolja mehanička svojstva, dobra čvrstoća, otpornost trošenju i tvrdoća. Cinkove legure se dobro strojno obrađuju, po svojstvima mogu zamijeniti željezni lijev. [1]

### **4.2 Aluminij i njegove legure**

Jedna od najvećih prednosti aluminija u tehnici je njegova mala gustoća, u odnosu na gustoću čelika gotovo je trostruko manja te se zbog toga aluminijske legure koriste za smanjenje mase konačnih proizvoda. Najviše se upotrebljavaju legure aluminija sa silicijem i magnezijem. Silicij daje dobru livljivost i mogućnost lijevanja tankostijenih odljevaka. Magnezij se dodaje za povećanje čvrstoće Al legura.

Koriste se legure s 5,5 do 10,5 % silicija koje su hipoeutektičke te u njima prvo dolazi do skrućivanja Al. Koriste se i legure s 10,5 do 13,5 % silicija kojima se struktura sastoji od eutektičke matrice. Hipereutektičke legure sastoje se od 16 do 23 % silicija te se u njima prvo skrućuje silicij. Ove legure imaju visoku otpornost na trošenje, razvijene su za lijevanje

blokova motora, a danas se koriste za široku primjenu. Problem kod ovih legura je visoko talište (700 do 760 °C) što skraćuje vijek trajanja kalupa.

Bitna karakteristika aluminijevih legura u odnosu na željezne legure je to što imaju značajnu dinamičku izdržljivost. Postoji i problem koji ne vrijedi zanemariti, a to je poroznost kao npr. vodikova bolest što negativno utječe na odljevak te je treba svesti na najniži mogući nivo. [1]

### 4.3 Magnezij i njegove legure

Magnezij se u automobilske industriji upotrebljava već godinama. Njegova relativno mala gustoća (1800 kg/m<sup>3</sup>) u odnosu na aluminij (2700 kg/m<sup>3</sup>) i potreba za uštedama na masi potiču inženjere u struci na povećanu upotrebu magnezijevih legura. Jednostavnost proizvodnje odljevaka od magnezijevih legura čini tu proizvodnju najpovoljnijom za lijevanje kokilnim ljevanjem.

Prednosti odljevaka od magnezija: manja gustoća, bolja istezljivost od ostalih legura, 20 do 30% kraći ciklus proizvodnje od aluminijskih legura, duži radni vijek kalupa, mogućnost izrade odljevaka tanjih stijenki.

Uglavnom se lijevaju legure magnezija jer čisti magnezij ima loša mehanička svojstva i nije otporan na visoke radne temperature. Za legiranje se najčešće koriste legure s aluminijem i cinkom. Maksimalna radna temperatura na kojoj se u eksploataciji koriste magnezijevi odljevci je do 100 °C, inače dolazi do puzanja materijala. Postoje i iznimke, specijalne magnezijeve legure koje mogu izdržati i do 150 °C radne temperature.

Pri taljenju magnezija u atmosferi ne prestaje njegova oksidacija kao kod aluminija (nastaje Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) te se zbog toga taljenje magnezijevih legura provodi u inertnoj atmosferi. Nečistoće magnezijevih legura ne isplivaju na površinu te su razvijeni posebni postupci za pročišćavanje njegove litine.

Magnezijske legure najčešće se upotrebljavaju u automobilske industriji za različita kućišta i dijelove koji nisu izloženi visokim radnim temperaturama. [1]

## 5. TEHNOLOŠKI POSTUPAK PROIZVODNJE KOKILNOG LIJEVA

Slijed tehnoloških operacija proizvodnje kokilnog lijeva prikazan je na slici 4.



Slika 4. Tehnološki postupak proizvodnje kokilnog lijeva [1]

### 5.1 Premazivanje kalupa

Ekonomičnost lijevanja u kalupe u velikoj mjeri ovisi o radnom vijeku kalupa. Tijekom rada dolazi do oštećenja kalupa kao što su pukotine, plinska korozija, deformacije, a sve zbog toplinskih opterećenja radne površine kalupa u dodiru s litinom.

Premazivanje kalupa i metalnih jezgri vrši se za vrijeme kad je kalup otvoren. Premazivanje se vrši četkom kod ručnih kalupa ili automatskim prskanjem kod automatizirane proizvodnje kokilnog lijeva.

Nanošenjem sloja vatrostalnog premaza na radnu površinu kalupa direktno se umanjuje neposredno toplinsko djelovanje litine na kalup. Prije nanošenja premaza kalup treba biti zagrijan na temperaturu od 150 do 200 °C. Debljina premaza kreće se od 0,2 do 0,6 mm, a može biti i preko 1 mm. Premazi su suspenzije sitnomljevenih vatrostalnih materijala,

vode i dodataka za bolje ljepljenje na površinu kalupa. Primjer nekih od vrsta premaza je mješavina borne kiseline 5%, cinkovog oksida 8%, vodenog stakla 2,5% i vode 84,5%.

Premazi imaju znatno manju toplinsku vodljivost od kalupa, djeluju kao izolatori te na taj način sprječavaju prijelaz topline s litine na kalup te štite kalup od toplinskih napetosti.

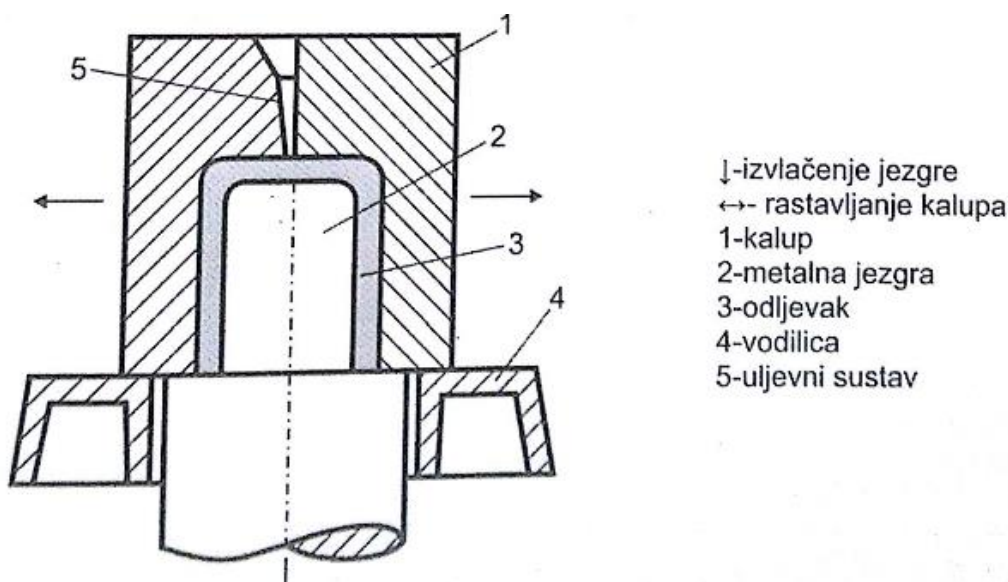
Premazi trebaju imati odgovarajuća svojstva: mala toplinska vodljivost, dobro prijanjanje uz radnu površinu kalupa, ne smiju stvarati plinove, postojanost na visokim temperaturama.

## 5.2 Ulaganje pješčanih i metalnih jezgri

Jezgrama se formiraju unutarnje šupljine odljevka. Ulaganje metalnih jezgri može se izvesti prije i nakon zatvaranja kalupa. To ovisi o podjeli kalupa, ako su jezgre na diobenoj ravni ili samo u jednom dijelu kalupa. Pješčane jezgre se ulažu prije zatvaranja kalupa.

### 5.2.1 Metalne jezgre

Metalne jezgre se upotrebljavaju za jednostavne šupljine u odljevku. Mora postojati mogućnost izvlačenja metalne jezgre iz kalupa nakon ulijevanja i skrućivanja litine, prikazano na slici 5.



Slika 5. Prikaz metalne jezgre u kalupu

Metalne jezgre izložene su najvećem toplinskim opterećenjima i znatnom trošenju, uz mehaničko opterećenje za vrijeme izvlačenja iz odljevka. Zbog toga se jezgre izrađuju od



legiranih čelika za rad u toplom stanju, najčešće se upotrebljavaju kod lijevanja legura od aluminijske i magnezijске.

Metalna jezgra koja odgovara unutarnjoj šupljini mora zadovoljiti sljedeće:

- lako postavljanje, bez mogućnosti njenog pomicanja tijekom ulijevanja litine
- lako izvlačenje jezgre iz odljevka, odmah nakon ulijevanja litine kada odljevak ima čvrstu koru i minimalno skupljanje.

Radi lakšeg izvlačenja jezgre iz odljevka postoje jezgre koje tijekom lijevanja i skrućivanja vibriraju, što olakšava njihovo izvlačenje. Postoje nepokretne i pokretne jezgre. Nepokretne se primjenjuju uz jednostavnije odljevke te su smještene na jednoj polovici kalupa. Pokretne jezgre po konstrukciji mogu biti izrađene iz jednog dijela, izrađene iz više dijelova te spojene u jednu cjelinu, izrađene iz više dijelova koje se pri vađenju odljevka vade određenim redoslijedom. [5]

### 5.2.2 Pješčane jezgre

Pješčane jezgre kod kokilnog lijeva upotrebljavaju se kada se trebaju postići složeni oblici šupljina u odljercima a nije moguća primjena metalnih jezgri. Pješčana jezgra se nakon lijevanja i hlađenja istresa iz odljevka pomoću vibracija. Koriste se kod legura lakih i teških obojenih metala npr. bakra, a najširu primjenu imaju kod lijevanja sivog lijeva i čelika.

Prednosti pješčanih jezgri su:

- moguće izvedbe složenih oblika i konfiguracija
- dobro propuštanje plinova
- ne sprečavaju skupljanje odljevaka prilikom hlađenja
- lako se izbijaju iz odljevka

Nedostaci pješčanih jezgri:

- jednokratna upotreba
- razvijaju plinove, što se odražava na kvalitetu odljevka [1]

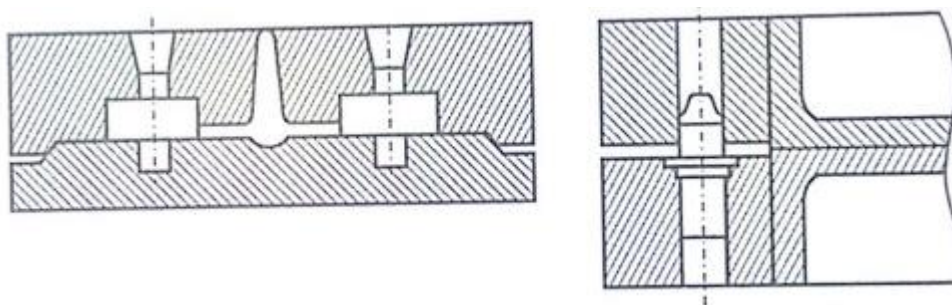


### 5.3 Zatvaranje kalupa

Nakon prethodnih operacija slijedi zatvaranje i stezanje kalupa. Zatvoreni kalup se dodatno osigurava kako nebi došlo do njegovog otvaranja, do povrede djelatnika i do netočnosti odljevka. [6]

#### 5.3.1 Centriranje kalupa

Prije ulijevanja litine potrebno je polovice kalupa sklopiti u jednu cjelinu. Na taj način se kompletira kalup i oblikuje kalupna šupljina koja odgovara obliku i dimenzijama odljevka. Da bi se dobile točne dimenzije kalupne šupljine potrebno je osigurati točno sklapanje polovica kalupa.

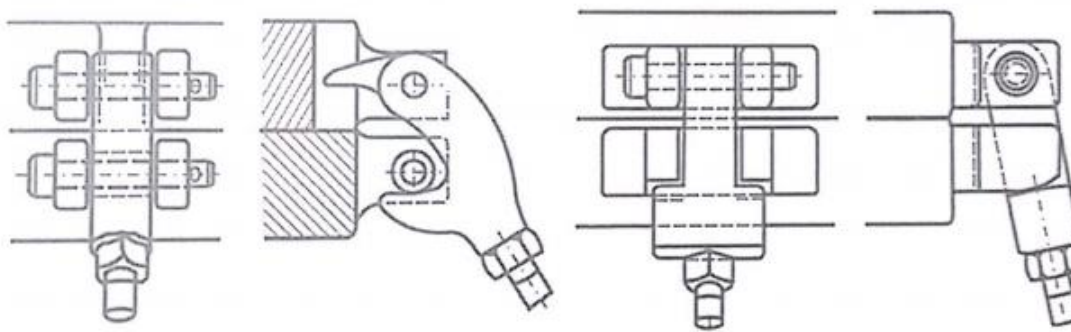


Slika 6. Centriranje polovica kalupa [1]

Centriranje kalupa može se ostvariti pomoću stepenastog dijeljenja kalupa (slika 6 - lijevo) i pomoći svornjaka (slika 6 – desno). Točnije centriranje kalupa postiže se pomoću svornjaka.

#### 5.3.2 Stezanje kalupa

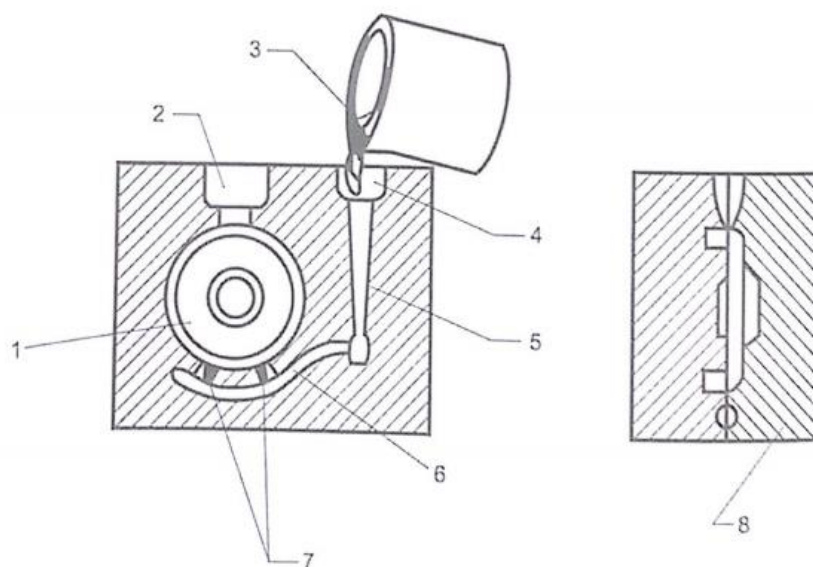
Prije ulijevanja litine slijedi stezanje polovica kalupa u jednu cjelinu da bi se dobile točne dimenzije odljevka i spriječilo prodiranje litine iz kalupne šupljine po diobenoj ravnini kalupa. Ručno stezanje izvodi se kod ručne proizvodnje kokilnim lijevom, stezanje se izvodi pomoću ekscentričnih poluga i njima određenim priхватima. Na automatiziranim i mehaniziranim linijama kalupi se zatvaraju pneumatski ili hidraulički. Prikaz na slici 7. [1]



Slika 7. Načini stezanja kalupa: lijevo – ručno; desno – automatizirano [1]

## 5.4 Ulijevanje litine

Nakon zatvaranja kalupa slijedi operacija ulijevanja litine za popunjavanje kalupne šupljine i dobivanja odljevka. Za dobivanje kvalitetnog odljevka potrebno je pravilno konstruirati uljevni sustav, slika 8.



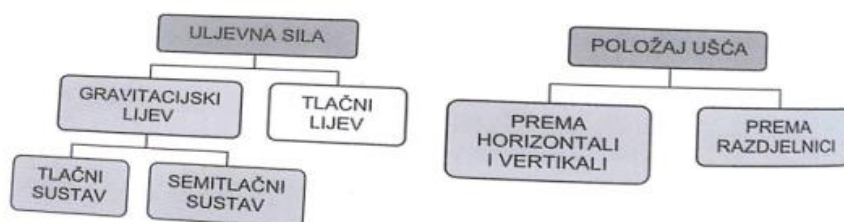
Ulijevanje litine u zatvoreni kalup  
 1-odljevak, 2-pojilo, 3-ljevački lonac  
 4-čашka, 5-spust, 6-razvodnik, 7-ušće  
 8-dio kalupa (polukalup)

Slika 8. Ulijevanje litine u zatvoreni kalup [1]

### 5.4.1 Uljevni sustav

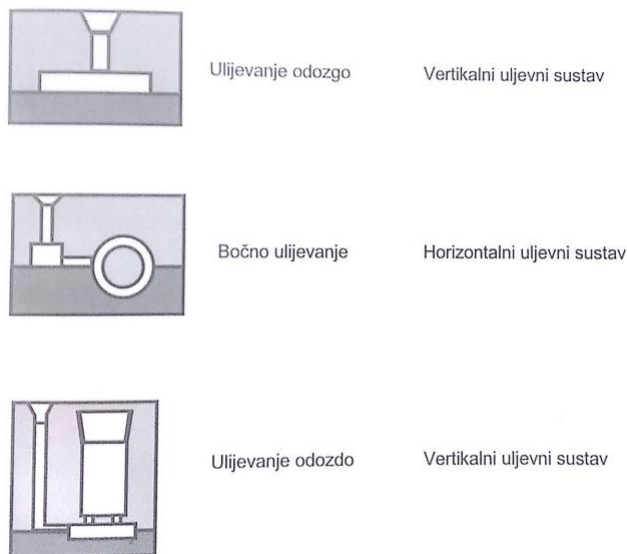
Uljevnim sustavom smatra se skup kanala različitog oblika kojim se litina dovodi u kalupnu šupljinu, tako da postigne popunjavanje u što kraćem vremenu, sa što manjim pregrijanjem, što mirnijim strujanjem i uz što manji utrošak materijala. Pored osnovne zadaće da popuni kalupnu šupljinu, uljevni sustav uvjetuje ne samo konačna kvalitativna svojstva odljevka, nego o njemu ovisi i izbor tehnologije lijevanja. Uljevni sustav mora osigurati povoljan raspored topline radi kompenzacije pojave usahlina i napetosti te povoljnu brzinu ulijevanja da ne dođe do usisavanja zraka. [6]

Kriterij za sistematizaciju uljevnih sustava može biti uljevna sila i položaj ušća, prikaz na slici 9.



Slika 9. Uljevni sustav prema kriteriju uljevnice sile i položaja ušća [1]

Uljevni sustav kod kokilnog lijeva može se izvršiti prema položaju ušća uljevnog sustava prema razdjelnici, odnosno na horizontalnu i vertikalnu ravninu, prikazano na slici 10. Razlikuje se lijevanje odzgo, bočno i uljevanje odozdo te vertikalni i horizontalni uljevni sustav.

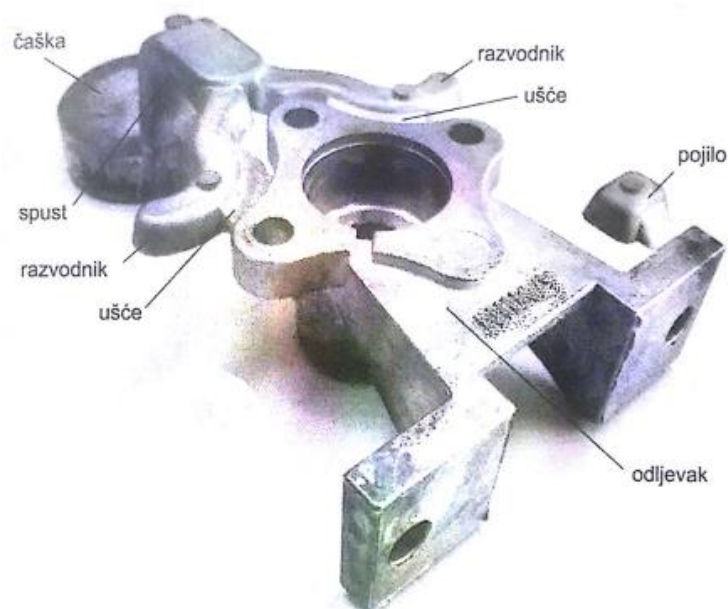


Slika 10. Uljevni sustavi u odnosu na razdjelnicu [1]

Vertikalni uljevni sustav i ulijevanje odozgo osigurava prirodni red skrućivanja, ali je teško primjenjiv kod visokih odljevaka. Pri udaru mlaza litine o dno kalupne šupljine dolazi do raspršivanja mlaza, a time i do oksidacije kapljica.

Horizontalni uljevni sustav, uz bočno ulijevanje omogućuje miran ulaz litine i povoljne uvjete kod odstranjivanja troske. Ovaj uljevni sustav primjenjuje se često. U pogledu reda skrućivanja uvjeti su znatno složeniji i ovisit će o obliku odljevka.

Vertikalni uljevni sustav i ulijevanje odozdo rjeđe se upotrebljava jer zahtijeva komplicirani način izrade. Odlikuje se mirnim punjenjem kalupne šupljine, ali s neprirodnim redom skrućivanja, što zahtjeva veća pojila. Omogućuje postupno istiskivanje zraka i plinova iz kalupa. Velika je primjena kod lijevanja aluminijske i magnezije. [1]



Slika 11. Odljevak Al legure sa slomljenim spustom uljevnog sustava [2]

Na slici 11. Prikazan je odljevak sa slomljenim spustom pravokutnog oblika. U uljevnom sustavu nema vrtloženja litine što je pogodno za lijevanje Al legura. Punjenje kalupa je mirno čime su izbjegnute greške u odljevku radi mogućeg povlačenja zraka.

## 5.5 Hlađenje kalupa

Da bi se povećao radni vijek kalupa i skratilo vrijeme očvršćivanja, kalupi se hlade. Hlađenje kalupa prirodnim ili prinudnim putem. Kod prirodnog hlađenja toplinu od litine akumulirat će jezgra i kalup i predati je okolini. Kod prinudnog hlađenja toplina se odvodi od vanjskog dijela kalupa prinudnim putem strujom zraka, vodenim hlađenjem ili kombinacijom

zraka i vode. Prinudno hlađenje je intenzivnije od prirodnog što je manja debljina stijenke kalupa, veća toplinska vodljivost materijala i veća vanjska površina kalupa. [6]

Sustav za hlađenje ima značajan utjecaj na životni vijek kalupa. Potrebna je mogućnost upravljanja temperaturom kako bi se mogao postići željeni gradijent što omogućava regulaciju i skrućivanje odljevka u kalupu.

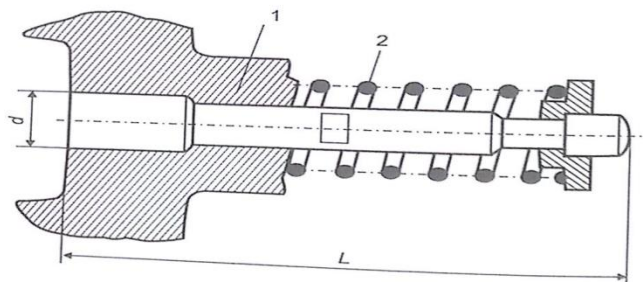
Hlađenje zrakom je polagano što pogoduje lijevanju tankostijenih odljevaka, ali ne zadovoljava kod hlađenja odljevaka s debljom stijenkom. U cilju poboljšanja efiksnosti hlađenja, kalupi se s vanjske strane izvode s rebrima, povećanjem površine za izmjenu topline povećava se intenzitet hađenja.

Hlađenje vodom izvodi se na nekoliko načina, intenzitet hlađenja je veći nego kod hlađenja zrakom. Načini hlađenja vodom:

- postava cijevi s vodom na stražnju stranu kalupa,
- postava cijevi s vodom na stroj za lijevanje, neposredni iza kalupa
- bušenjem rupa za cirkulaciju vode kroz kalup

## 5.6 Otvaranje kalupa i izbacivanje odljevka

U svrhu bržeg izbacivanja odljevka iz kalupa ugrađuju se izbacivači. Nakon otvaranja kalupa aktiviraju se izbacivači te odvajaju odljevak od kalupa. Izbacivači mogu biti i nepokretni, ali u tom slučaju polovica kalupa mora biti pokretna što je čest slučaj kod automatizirane proizvodnje. Kod odljevaka manje visine, pločastog oblika izbacivači se ne upotrebljavaju. Tijekom lijevanja litine u kalup, izbacivač je sastavni dio ravnine površine kalupa pa se često puta njegov otisak poznaje na odljevku. Na slici 12 prikazan je izbacivač. [1]



Slika 12. Izbacivač odljevka [2]

## 6. IZVEDBE KALUPA ZA KOKILNI LIJEV

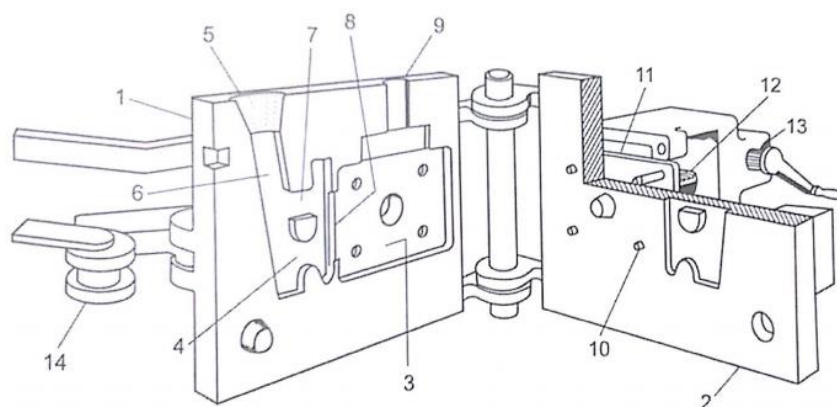
Kokilnim lijevom naziva se postupak lijevanja odljevaka u metalne kalupe – kokile. Vanjski oblik definiran je kalupnom šupljinom, a šupljine u odljevku definiraju se pomoću jezgri. Toplinski udar litine na kalup glavni je utjecajni parametar za određivanje vijeka trajanja kalupa. Litina se ulijeva na temperaturama kalupa od 150 do 300 °C, a materijal kalupa izložen je eroziji i toplinskom udaru. Zbog toga je nužno odabrati odgovarajući materijal kalupa.

Prilikom ulijevanja litine kalup se naglo zagrijava, a nakon ohlađivanja i vađenja odljevka, kalup se naglo hladi.

Konstrukcija odljevaka i kalupa složen je posao, zahtjeva poznavanje načina proizvodnje kalupa, ljevačka svojstva pojedinih materijala, tehniku lijevanja, uzroke pojave grešaka na odljencima itd.

### 6.1 Ručni kalupi

Ručni kalupi se uglavnom koriste za odljevke jednostavnijih oblika. Dijelovi kalupa povezani su pantima. Nepokretna polovica kalupa nalazi se pričvršćena za radni stol i na njoj se nalazi uređaj za izbacivanje odljevaka. Kalup se zatvara pomoću mehanizma s ekscentrom, a lijevanje se izvršava ručno pomoću lonca za lijevanje. Na slici 13 prikazan je kalup za ručno lijevanje odljevaka. [1]



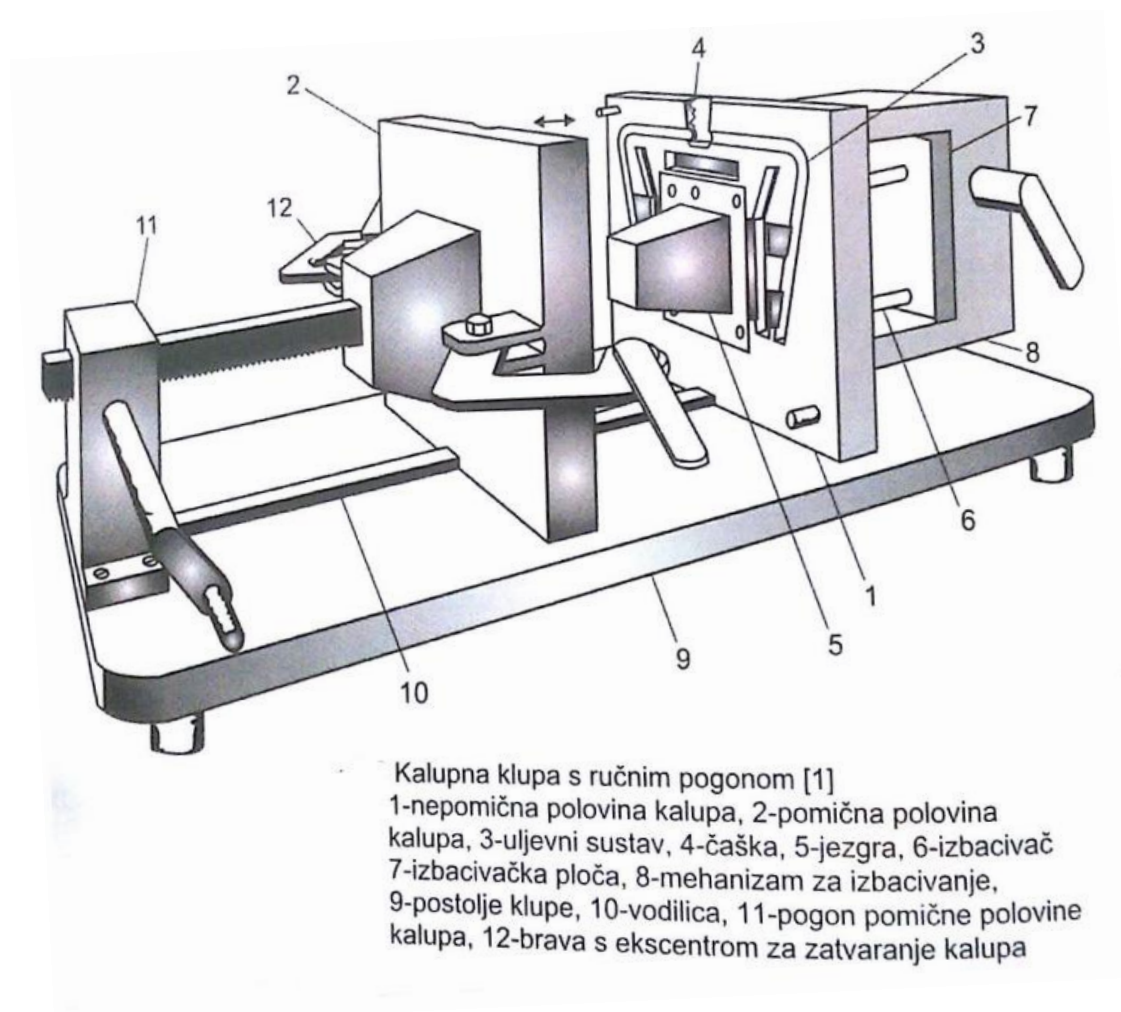
Ručni kalup za lijevanje kokilnog lijeva [1]  
 1-pomična ploča kalupa, 2-nepomična ploča,  
 3-kalupna šupljina, 4-uljevni sustav, 5-čaška, 6-spust  
 7-razvodnik, 8-ušća, 9-pojilo, 10-jezgra, 11-jezgrena ploča  
 12-zubna letva za povlačenje jezgri, 13-zupčanik s ručnim  
 pogonom, 14-brava s ekscentrom za zatvaranje kalupa

Slika 13. Ručni kalup za kokilno lijevanje [1]



## 6.2 Kalupna klupa

Načinom lijevanja pomoću kalupne klupe dobiju se odljevci složenijeg oblika za što su potrebni uređaji s pomičnom i nepomičnom pločom na kojoj se pričvršćuju polovine kalupa. Kalup se otvara pomicanjem pomične polovine kalupa. Ploča se pomiče mehanički ili hidraulički. Na slici 14. prikazana je kalupna kokilna klupa s ručnim pogonom. [1]



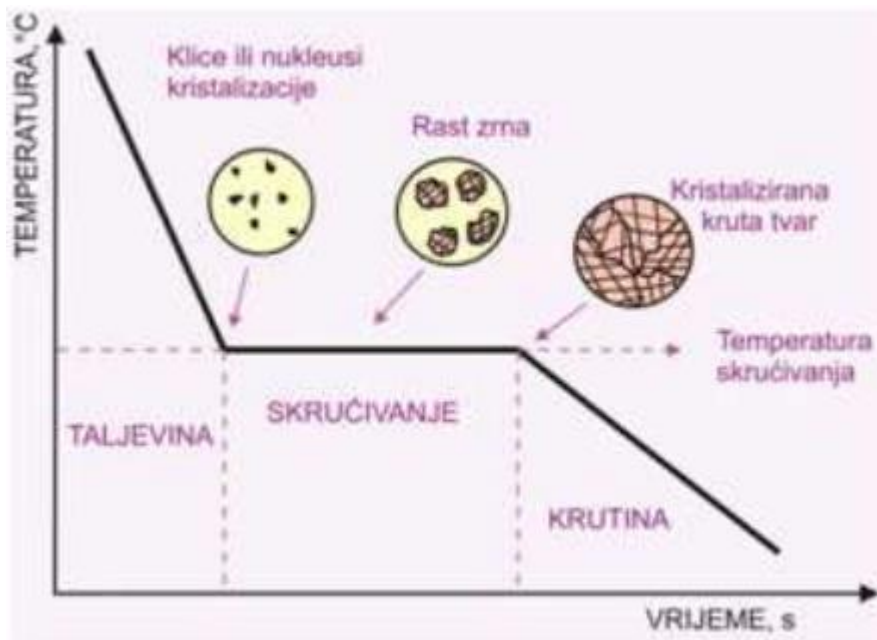
Slika 14. Kokilna kalupna klupa [1]

## 7. SKRUĆIVANJE METALA I LEGURA

Skrucivanje ili kristalizacija je fazni prijelaz taljevine u krutinu. Uvjeti pri kojima se odvija skrucivanje, utječu na fizikalna i mehanička svojstva, veličinu i raspored nastalih faza, određuju strukturu, stupanj segregiranja, te određuju postupke daljnje obrade. Do skrucivanja metala ili legura dolazi kada su ispunjeni sljedeći uvjeti:

- pothlađenost taline
- prisustvo klica
- odvođenje topline iz sustava.

Prijelaz iz tekućeg u kruto stanje popraćen je oslobađanjem latentne topline skrucivanja. Latentna toplina skrucivanja je količina topline koja se oslobodi kada tvar, odnosno taljevina promijeni svoje agregatno stanje iz kapljevito u kruto, pri konstantnoj temperaturi. Tijekom ovog procesa potrebno je odvesti toplinu. Ona se odvodi zračenjem, kondukcijom i konvekcijom. Brzina skrucivanja proporcionalna je brzini odvođenja topline. Nakon što sva taljevina prijeđe u kruto stanje više se ne razvija latentna toplina. Brzina skrucivanja proporcionalna je brzini odvođenja topline. Na slici 15. prikazan je dijagram temperatura/vrijeme te shematska krivulja hlađenja čistog metala.



Slika 15. Prikaz krivulje hlađenja čistog metala [6]

Skrucivanje se odvija u dvije faze:

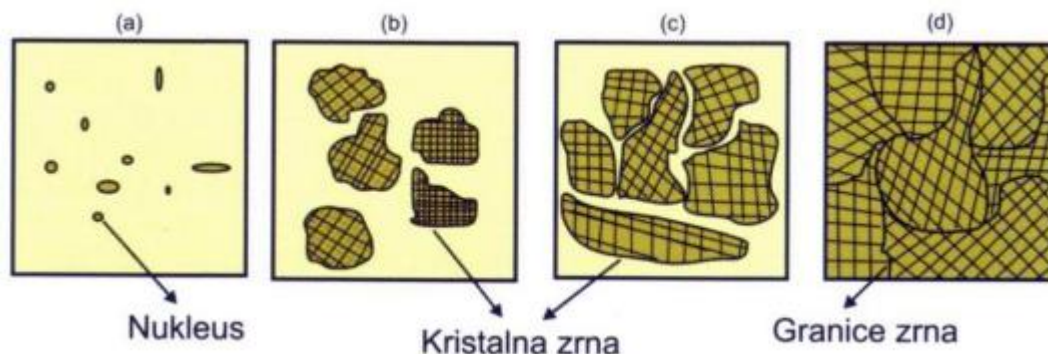
- prvo se odvija nukleacija (fizikalni proces stvaranja nove faze u materijalu)
- zatim rast kristala (transport atoma iz taljevine na graničnu površinu kruto/tekuće)



Na slici 16 prikazan je tijek skrućivanja. Uočava se da prvo nastaju klice iz kojih se razvijaju kristalna zrna. Različito orijentirana kristalna zrna (orijentacija ovisi o smjeru odvođenja topline i o kristalnoj strukturi metala) vežu se jedna na druge. Kristali rastu sve dok se ne sudare, nakon čega se njihov rast nastavlja, između njih javljaju se nepravilne granice površine koje nazivamo granicama zrna. Proces skrućivanja je završen kada nestane taljevine. Izuzetak kod skrućivanja je rast monokristala, gdje se rast omogućava samo jednom zrnju. Postupci proizvodnje monokristala strogo su kontrolirani. Proizvodi dobiveni na ovaj način imaju specijalna svojstva koja nije moguće postići kod skrućivanja polikristalinih metala (metala s velikim brojem zrna). Skrućivanje čistih metala rijetko se susreće u praksi. Kod skrućivanja legura utječu tri osnovna faktora: kemijski sastav, brzina rasta i temperaturni gradijent ispred fronta skrućivanja kruto/tekuće.

Skrućivanje legura dijeli se na:

- skrućivanje jednofaznih primarnih kristala (skrućivanje jednofazne legure, ćelijasto i ćelijasto dendritno skrućivanje, te dendritno skrućivanje)
- skrućivanje višefaznih legura (eutektičko i peritektičko skrućivanje).



Slika 16. Faze skrućivanja: a) nukleacija kristala u taljevini, b) i c) rast kristala, d) završeno skrućivanje [11]

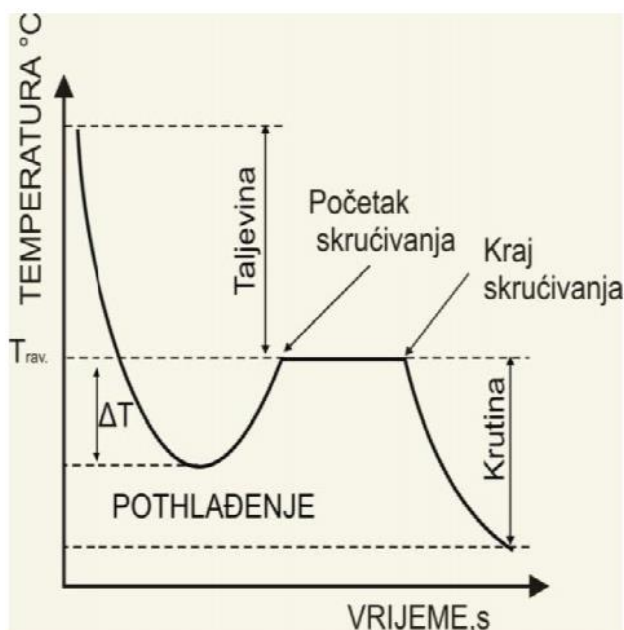
## 7.1 Nukleacija

Nukleacija je početna faza procesa skrućivanja, odnosno proces nastajanja klica. Skrućivanje započinje nukleacijom, a dalje se nastavlja rastom kristala u taljevini i stvaranjem kristalnih zrna. Postoje tri vrste nukleacije: homogena, heterogena, dinamička.

### 7.1.1 Homogena nukleacija

Homogena nukleacija prisutna je kod izrazito čistih metala. U realnim uvjetima skrućivanja ne dolazi do homogene nukleacije, zbog prisustva stranih čestica u taljevini i

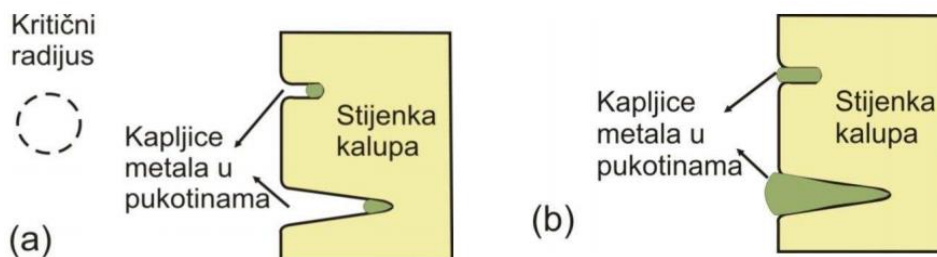
stijenki kalupa. Ovo je najteži put stvaranja klica i kristala jer je potrebno prevladati energetske barijere granične površine klica/taljevina. Za prevladavanje te energetske barijere potrebno je veliko pothlađenje (razlika između ravnotežne i stvarne temperature skrućivanja). Homogena nukleacija je dominantna i spontana kod čistih metala. Prema nekim istraživanjima do homogene nukleacije teško dolazi zbog tjecaja gravitacije [5]. U realnim uvjetima skrućivanja ne dolazi do homogene kristalizacije zbog prisustva stranih čestica u taljevini. Termodinamičko pothlađenje taljevine pokreće nukleaciju, što je ono veće, veća je vjerojatnost spontane nukleacije.



Slika 17. Krivulja hlađenja čistog metala s pothlađenjem [8]

### 7.1.2 Heterogena nukleacija

Heterogena nukleacija odvija se u realnim uvjetima pri skrućivanju metala i legura uz vrlo malo pothlađenje. Nukleacija se odvija uz prisustvo stranih čestica, a to su uključci, nečistoće, oksidni filmovi i stjenke kalupa. Strane čestice već imaju neku postojeću graničnu površinu, te se na taj način smanjuje energetska barijera koju treba prevladati da bi nastala klica. U industrijskoj praksi heterogena nukleacija potpomaže se dodatkom sredstava za usitnjavanje zrna u taljevinu. Realne stijenke pune su mikropukotina i pora. Prema slici 18 klica nastaje u korijenu pukotine. Pukotina je učinkovito mjesto za nastank klice ukoliko njezin otvor nije manji od kritičnog radijusa  $r$ .



Slika 18. Heterogena nukleacija na stjenci kalupa: a) kritična veličina klice, b) gornja klica ne može rasti iz pukotine dok donja može

## 7.2 Rast kristala

Daljnijim odvođenjem topline, nakon što je započeo proces nukleacije, dolazi do rasta kristala. Ovaj stadij skrućivanja traje sve dok ne nestane taljevine. Nukleus raste i stvara kristale. Rast kristala ovisi o kristalnoj rešetki koja nastaje na međufaznoj granici kruto / tekuće i o temperaturi. Najveći utjecaj na brzinu rasta kristala ima temperatura. Temperatura međufazne granice kruto / tekuće mora biti manja od ravnotežne temperature da bi kristal mogao rasti. Način odvođenja topline utječe na konačnu strukturu krutine i određuje mehanizam rasta. Proizlazi da su dva čimbenika bitna za rast kristala, struktura granične površine i kinetika priključenja atoma na graničnu površinu kruto / tekuće (difuzija, prijenos mase i topline).

Postoje dvije vrste međufazne granične površine kruto/tekuće:

- hrapava ili difuzna granična površina kruto / tekuće (nefasetirana)
- glatka granična površina kruto / tekuće (fasetirana)

## 8. SIMULACIJA LIJEVANJA

Zadatak simulacije lijevanja je istražiti nedostatke lijevanja i poboljšati procese lijevanja pomoću računalnog softvera za simulaciju lijevanja u metalne kalupe. Simulacija lijevanja nalazi primjenu kod svih procesa lijevanja gdje su moguće pojave grešaka na odljevcima. Računalnom simulacijom dolazi se do podataka tj. do nedostataka koji se mogu pojaviti prilikom lijevanja, a to su pukotine i nastale šupljine. Do pojave nedostataka dolazi zbog nepravilnog projektiranja uljevnog sustava te pogrešnog odabira parametara lijevanja.

ProCAST / QuickCAST je jedan od softvera koji se koriste za simulaciju procesa skrućivanja odljevka i za vizualizaciju problematičnih područja i nedostataka koji se mogu pojaviti na lijevanom odljevku.

### 8.1 Počeci primjene programa za simulacije

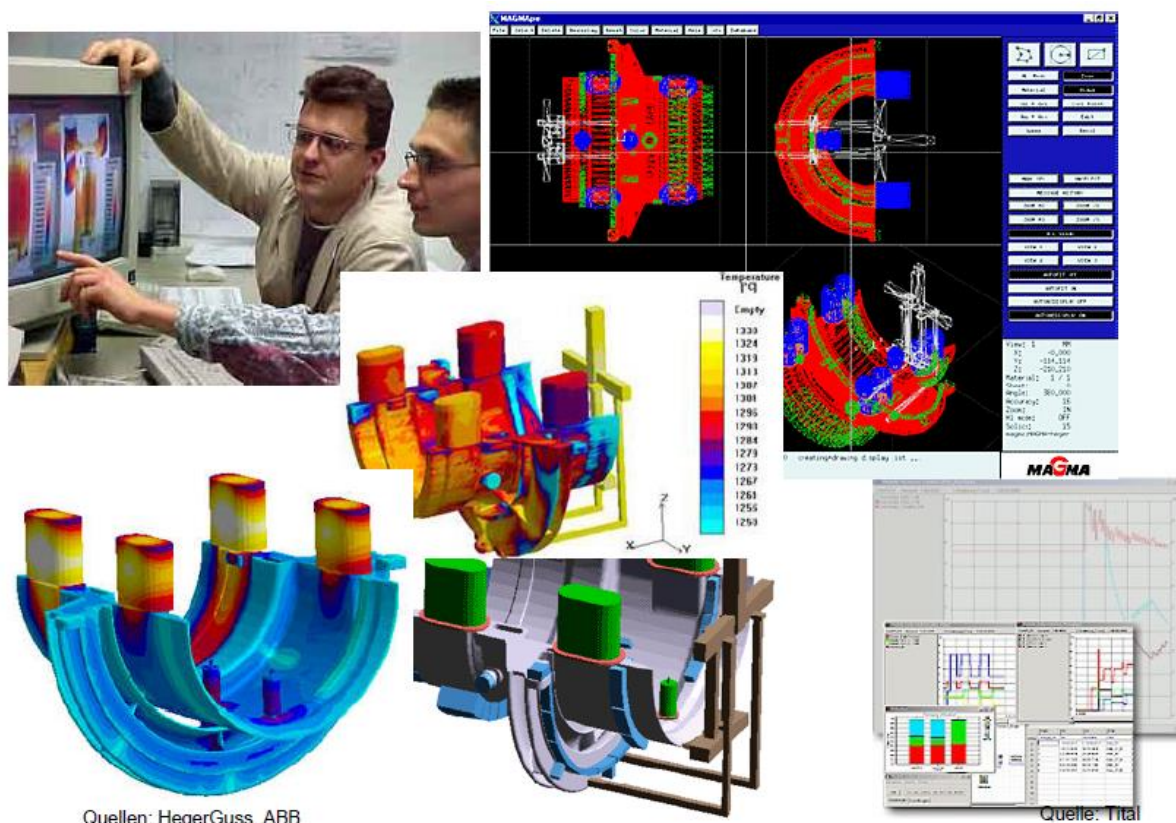
Lijevanje je jedan od najvažnijih tehnoloških i ekonomskih procesa u prerađivačkoj industriji tj. proizvodnji metalnih proizvoda. Proces proizvodnje u lijevaonicama započinje narudžbom kupca što uključuje definiranje dimenzija, tolerancija, vrstu materijela, kvalitetu obrade površine, mehanička svojstva proizvoda itd. Slijedeći korak je projektiranje uljevnog sustava za što je zadužen inženjer ili tehnolog. Projektiranje može potrajati nekoliko dana ili nekoliko tjedana ovisno o složenosti odljevka.[9]

U prošlosti inženjeri su nastojali poboljšati proces lijevanja, s vremenom su eliminirali nedostatke, no metodom pokušaja i pogreške taj proces je bio dugotrajan i skup, tražio je iskustvo i vještinu projektiranja. Tijekom godina znanstvenici su razvili teorije i matematičke modele kojima se opisuju svojstva materijala kada prolazi kroz skrućivanje. [10]

Iz matematičkih modela razvili su se alati poput programa za simulaciju lijevanja i skrućivanja kojima se uspješno uoče greške prije nego se pravi proizvod podvrgne postupku lijevanja. Nakon mnogo godina razvoja programa za simulaciju lijevanja, virtualne simulacija zakoračile su u područje zrelosti. Kao takve omogućuju testiranje i analiziranje podataka dobivenim simuliranjem lijevanja, što u konačnici doprinosi poboljšanju proizvodnosti.

## 8.2 Simulacija lijevanja

Simulacijski softver je idustrijski specifičan programski paket koji korisniku omogućava simulaciju cjelokupnog procesa lijevanja od popunjavanja kalupne šupljine do skrućivanja uključujući predviđanje grešaka. Simulacijski softver za lijevanje može predvidjeti vrste greške i gdje će se pojaviti što će utjecati na konačno vrijeme lijevanja. Skrućivanje odljevka je neleinearno te uključuje promjenu faze uz oslobađanje latentne topline. Latentna toplota skrućivanja je količina topline koja se oslobodi kada tvar, odnosno taljevina promijeni svoje agregatno stanje iz kapljevito u kruto, pri konstantnoj temperaturi. Tijekom ovog procesa potrebno je odvesti toplinu. Ona se odvodi zračenjem, kondukcijom i konvekcijom. Simulacijski programi posjeduju podatke metala i njihovih legura. Na slici 19 prikaz je primjera računalne simulacije uz lijevanje.



Slika 19. Simulacije lijevanja [12]

### 8.3 Koraci u simulaciji lijevanja

Koraci koji se vrše za vrijeme simulacije lijevanja:

1. Izrada 3D modela: generiranje STL formata modela iz CAD programa
2. Odabir materijala: materijal odljevka, materijal kalupa, granični uvjeti
3. Pokretanje simulacije
4. Generiranje rezultata simulacije
5. Analiza rezultata i donošenje odluke o prihvatanju ili ispravljanju

### 8.4 Simulacijski program

Simulacijski program omogućava kompletno industrijsko rješenje za ljevaonice te realna i detaljna predviđanja svakog dijela procesa lijevanja. Simulacija se odvija na temelju metode konačnih razlika (FDM). Metoda konačnih razlika je metoda za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Metoda konačnih razlika zahtjeva zamjene domene mrežom. Simulacijski program može simulirati temperaturne promjene i prijelaze topline tijekom lijevanja i skrućivanja. Program ima mogućnost vizualizacije područja nastalih problema koji se mogu pojaviti na odljevku tijekom lijevanja. To može pomoći smanjiti vrijeme i gubitke u odnosu na probno lijevanje.



## 9. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio temelji se na simulaciji lijevanja za četiri varijante. Varijante su grupirane po kriteriju temperatura lijevanja i temperatura predgrijavanja kokile, prikazano u Tablici 1. Simulacija lijevanja izvedena je za temperature lijevanja pri 720 °C i pri 640 °C u kombinaciji s temperaturama kalupa 200 °C i 300 °C. Naknadno je izvršeno lijevanje odljevka u Laboratoriju za ljevarstvo te su uspoređeni rezultati iz simulacija u odnosu na stvarni odljevak.

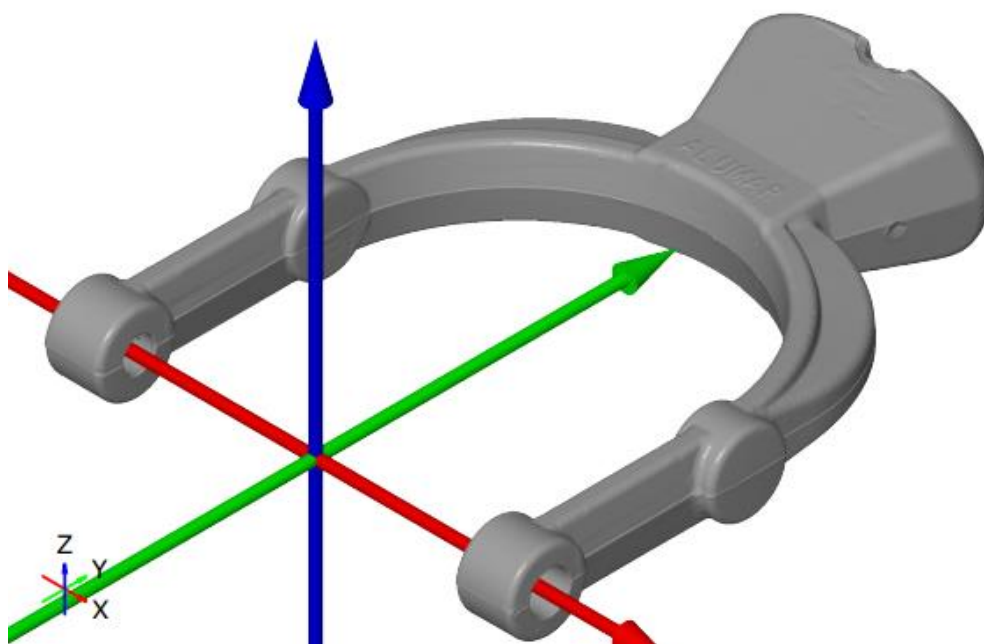
Tablica 1. Grupe po kriteriju temperatura lijevanja i temperature predgrijavanja kokile

	Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3	Varijanta 4
Temperatura lijevanja °C – temperatura kokile °C	720-300	720-200	640-300	640-200

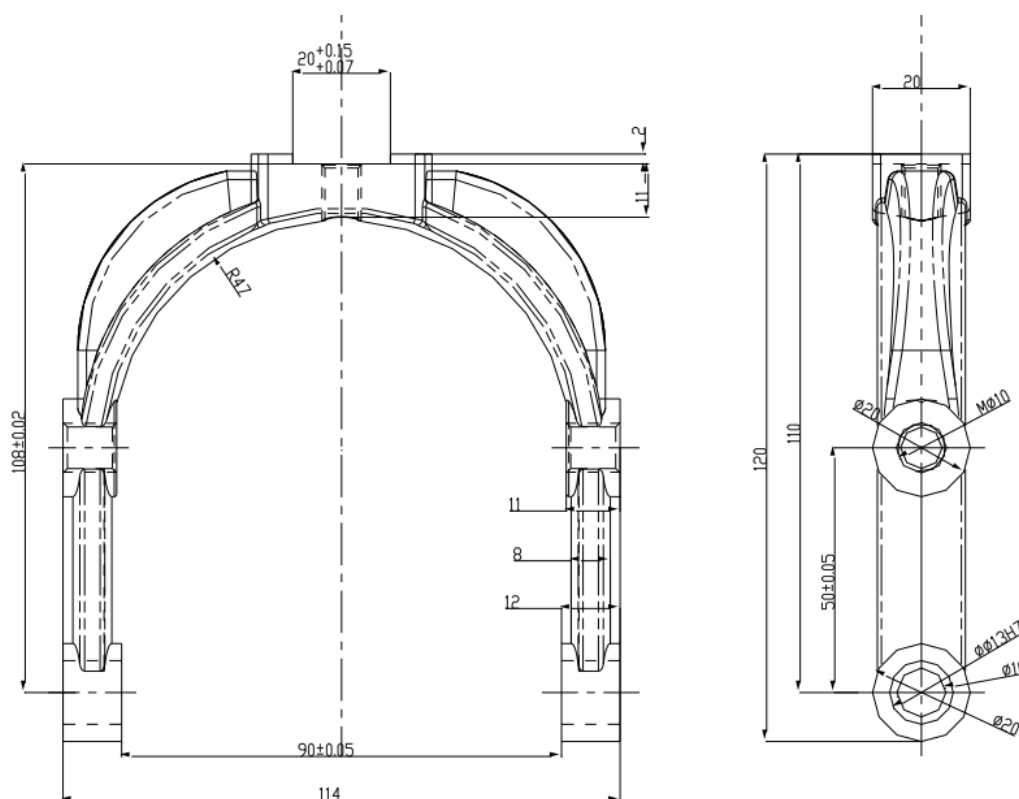
Simulacija lijevanja se izvodi u softverskom paketu ProCAST. Uzorak odnosno odljevak je vilica od aluminijske legure, konačan proizvod prikazan je na slici 20.



Slika 20. Vilica od aluminijske legure



Slika 21. 3D prikaz vilice



Slika 22. Nacrt vilice

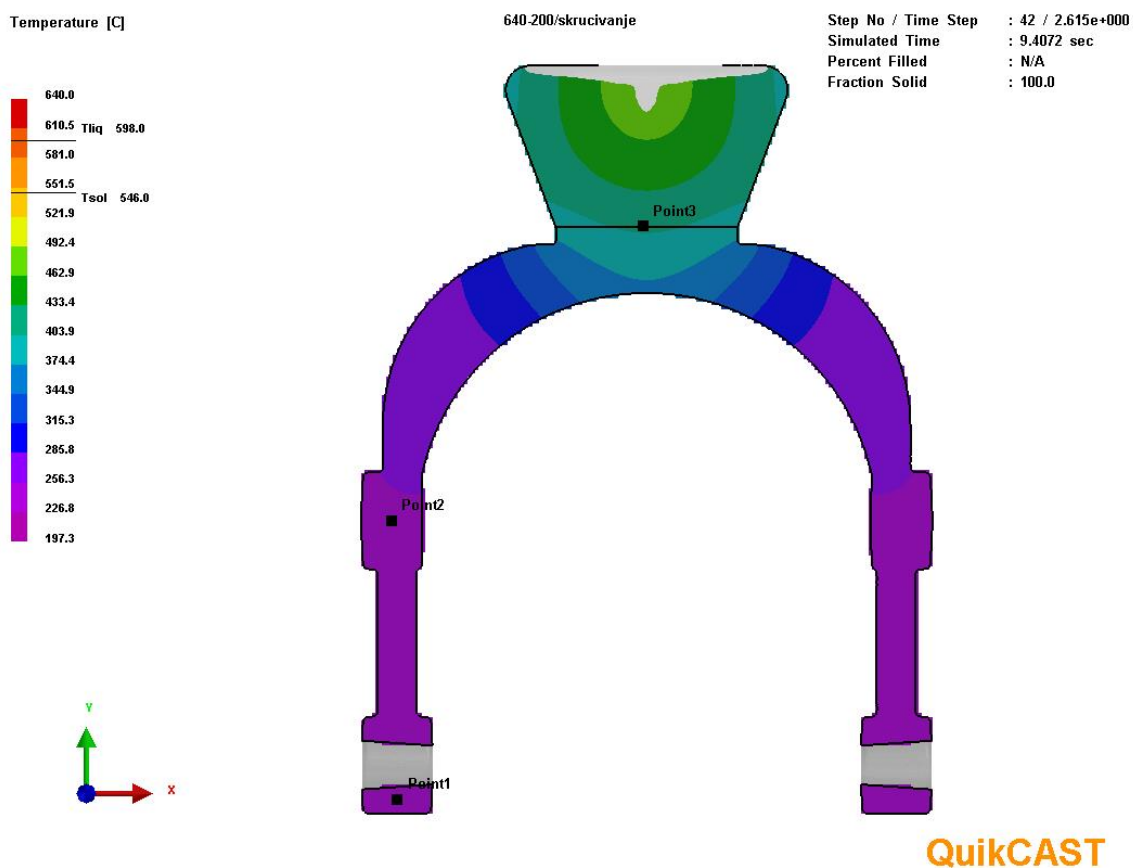
CAD model vilice dobiven je 3D skeniranjem, a iz njega je napravljena STL datoteka koja je potrebna za izvođenje simulacije lijevanja i skrućivanja, prikaz na slici 21. Vanjske dimenzije su 114 x 108 x 20 mm, prikaz nacrt na slici 22.



## 9.1 Snimanje krivulje hlađenja u odljevku

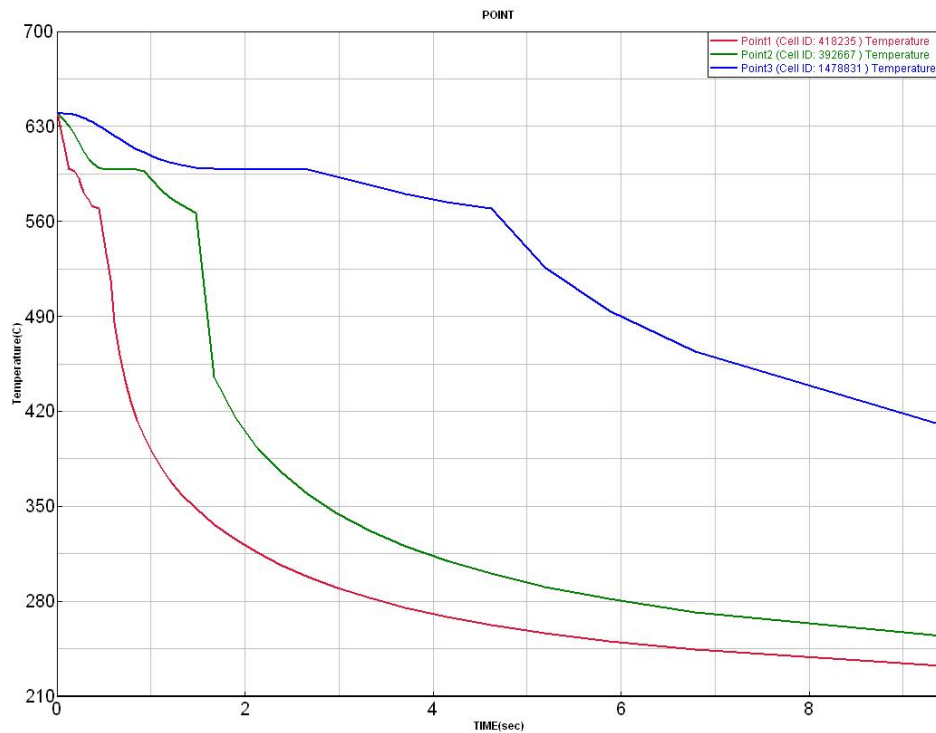
Snimanja su izvršena u softverskom paketu QuikCAST.

Na slici 23 prikazana su mjesta na kojima su snimane krivulje hlađenja u odljevku.

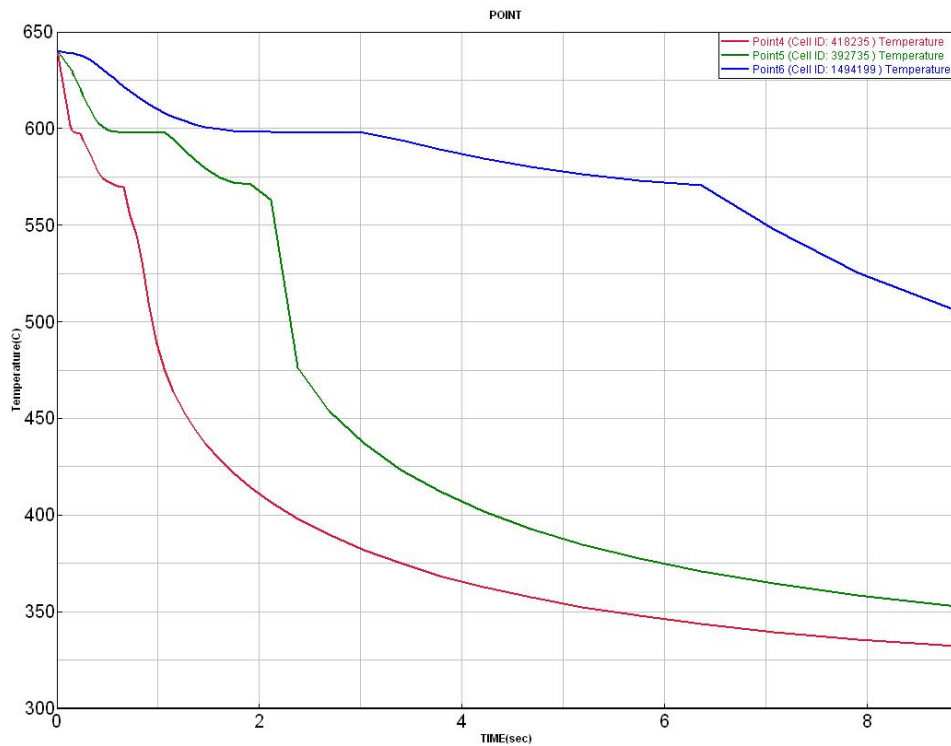


Slika 23. Karakteristična mjesta odljevka za snimanje krivulja hlađenja

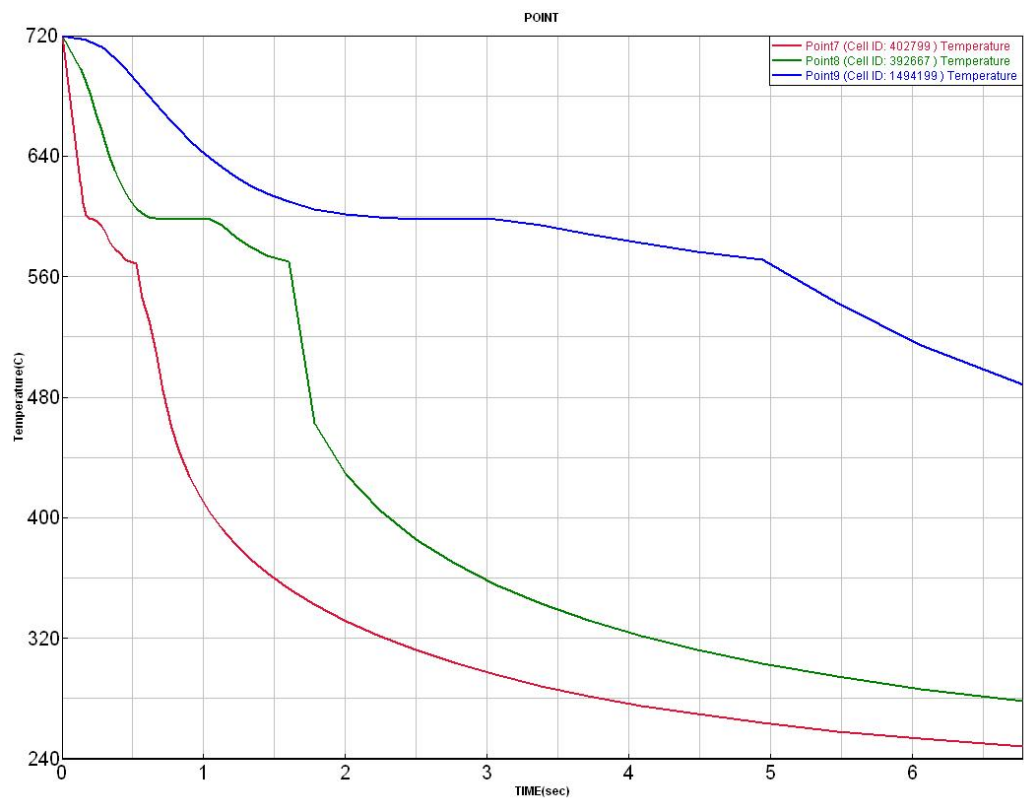
Na slikama 24, 25, 26 i 27 u nastavku, prikazane su snimljene krivulje hlađenja karakterističnih mjesta odljevka za četiri kombinacije temperatura odljevka i temperatura kokile.



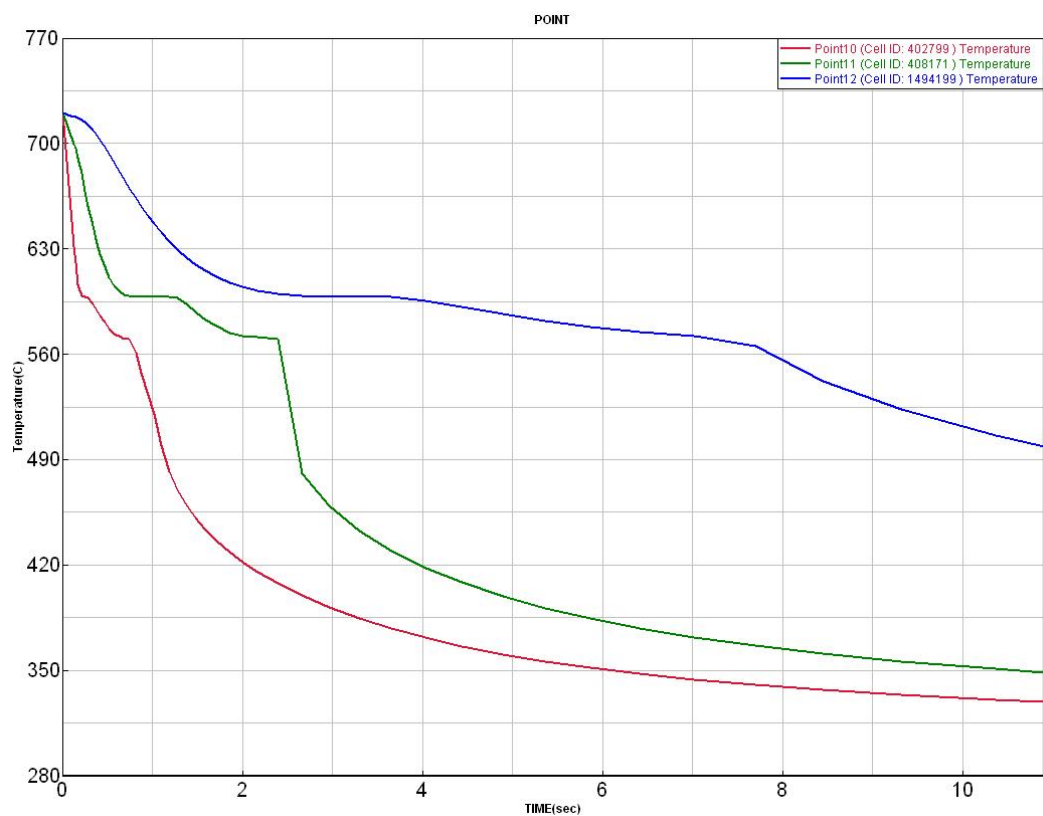
Slika 24. Krivulja hlađenja u odljevku, varijanta 640-200



Slika 25. Krivulje hlađenja u odljevku, varijanta 640-300



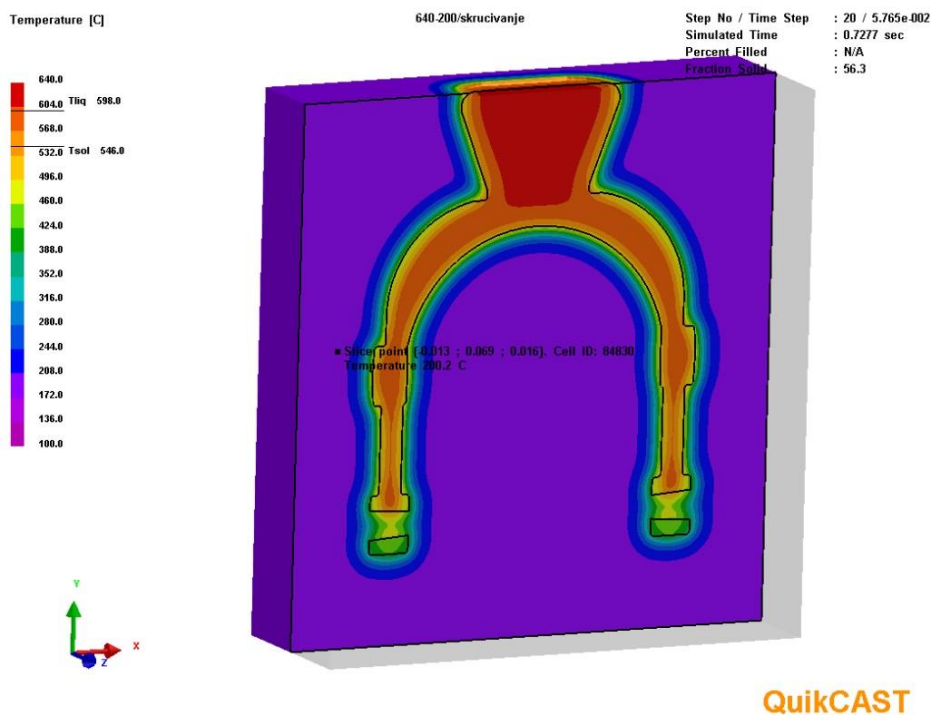
Slika 26. Krivulje hlađenja u odljevku, varijanta 720-200



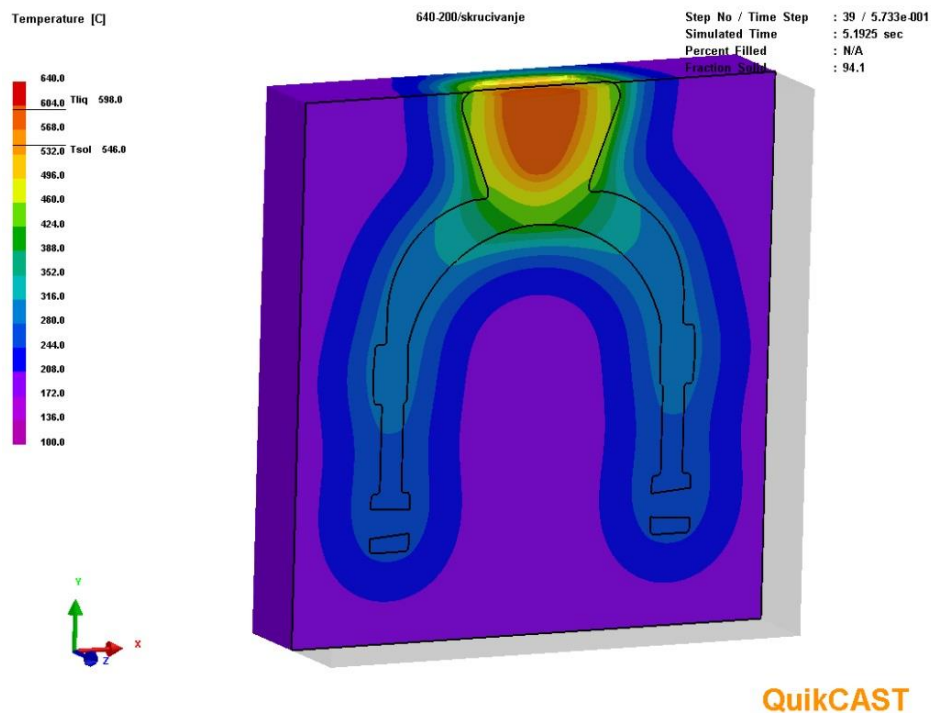
Slika 27. Krivulje hlađenja u odljevku, varijanta 720-300

## 9.2 Snimanje krivulja hlađenja u kokili

Na slici 28 prikazano je temperaturno polje u odljevku i kokili u trenutku kada je jezgra maksimalno zagrijana, a na slici 29 temperaturno polje kokile i odljevka na kraju skrućivanja.

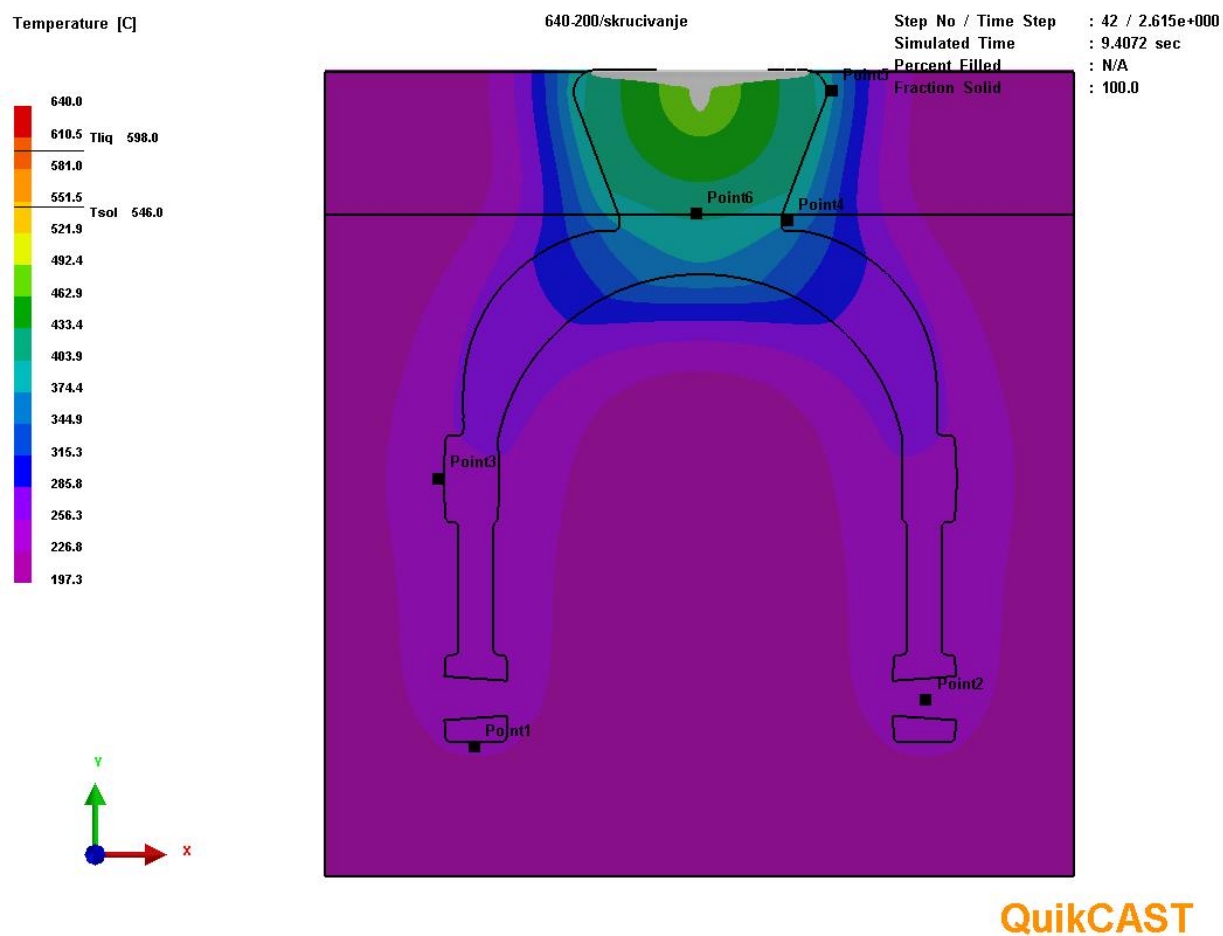


Slika 28. Maksimalno zagrijana jezgra, varijanta 640-200



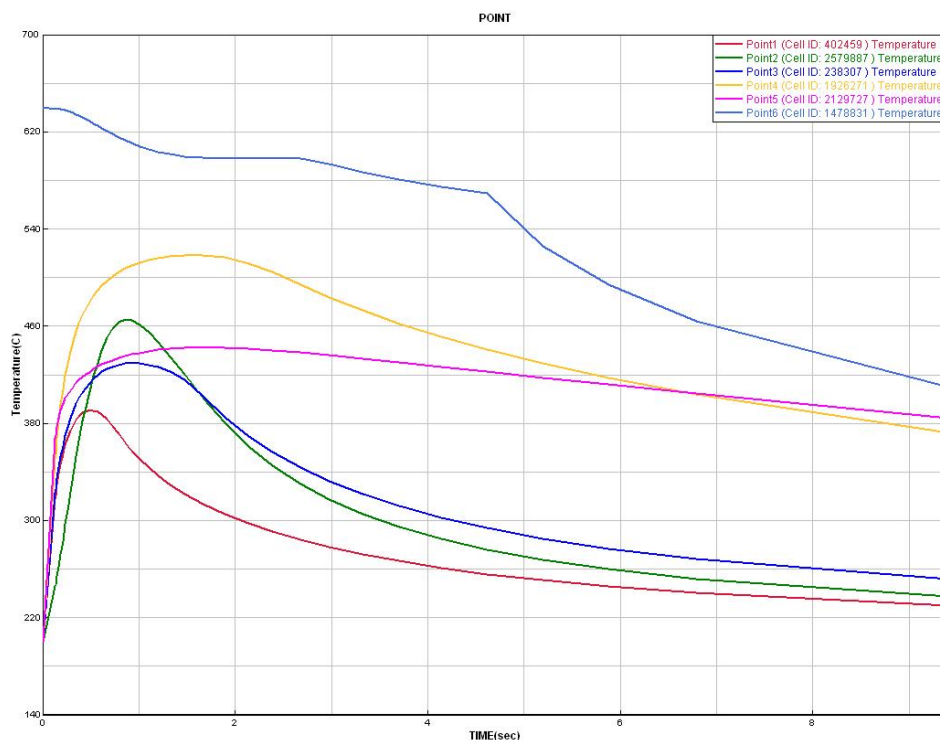
Slika 29. Temperaturno polje kokile i odljevka na kraju skrućivanja

Na slici 30 prikazana su mjesta na kojima su snimane krivulje promjena temperature u kokili.

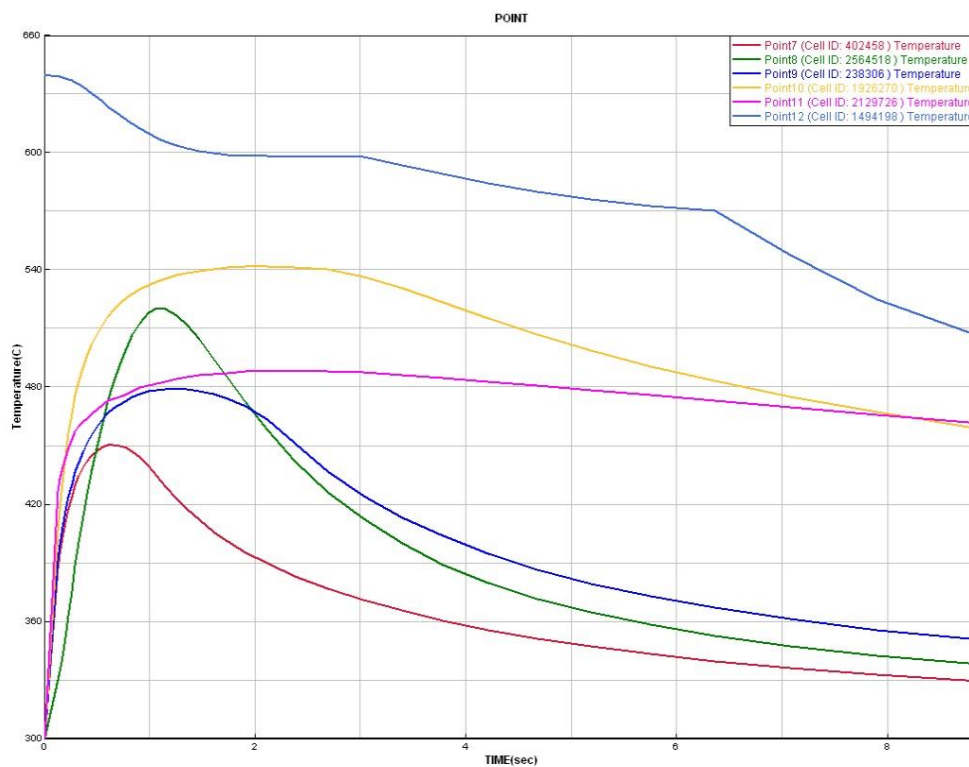


Slika 30. Karakteristična mjesta gdje su snimane krivulje temperaturnih promjena u kokili (1-5) i odljevku (6)

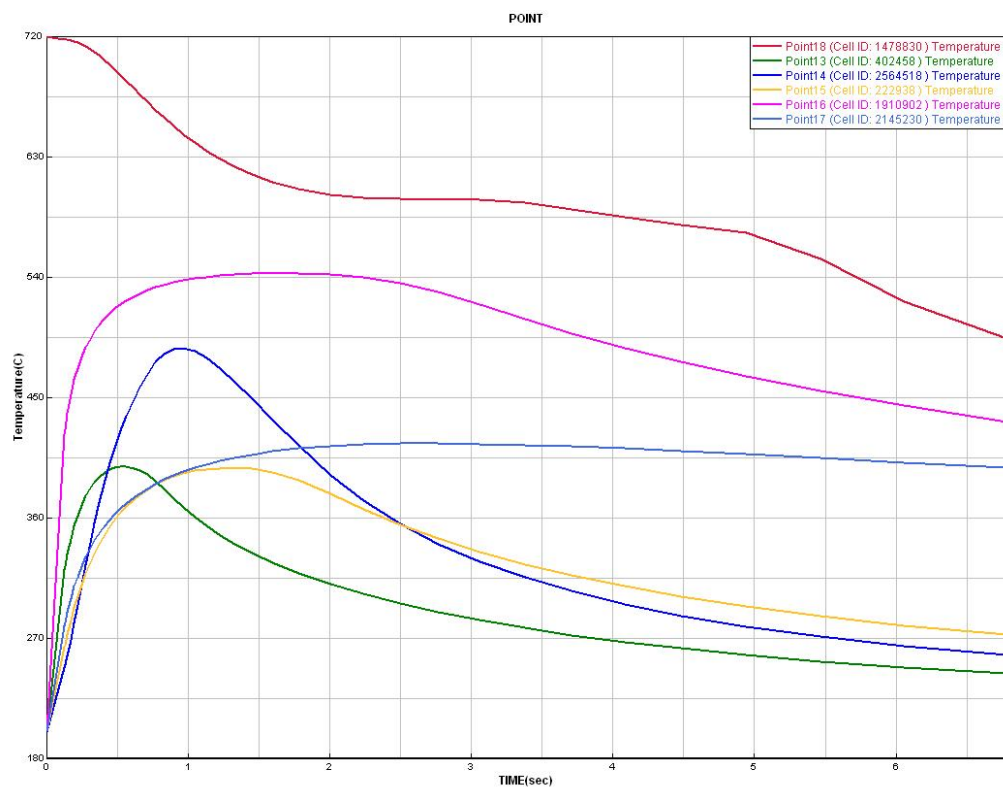
Na slikama 31, 32, 33 i 34 u nastavku, prikazane su snimljene krivulje zagrijavanja i hlađenja karakterističnih dijelova kokile za četiri kombinacije temperatura odljevka i temperatura kokile.



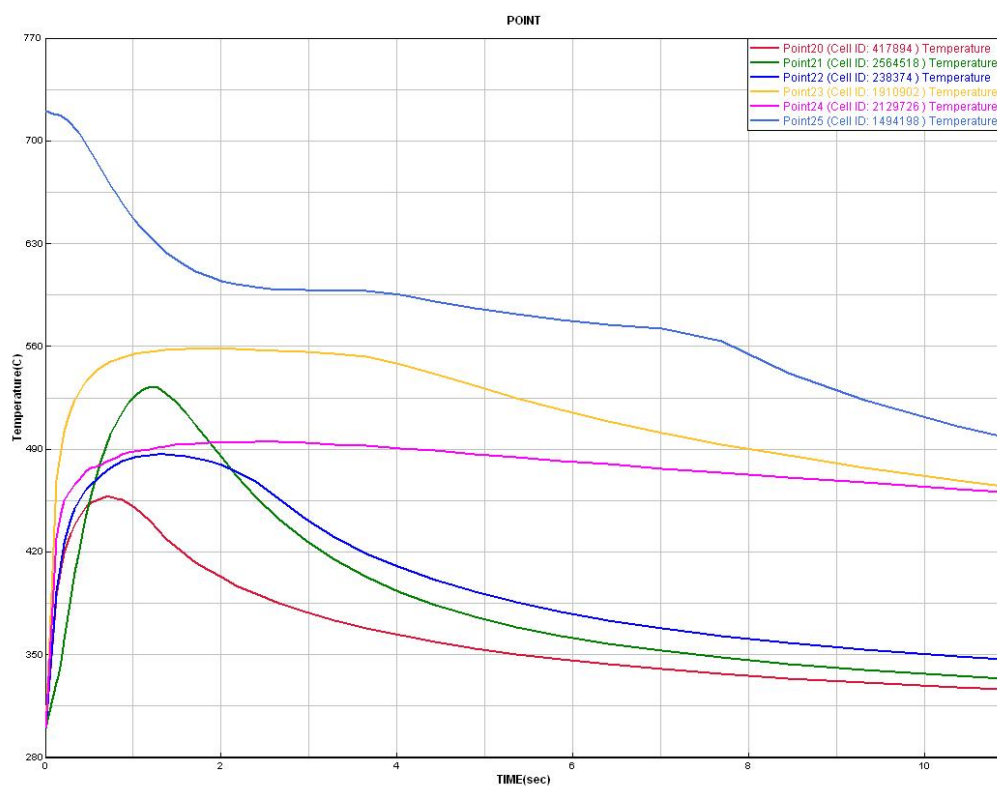
Slika 31. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 640-200



Slika 32. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 640-300



Slika 33. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 720-200



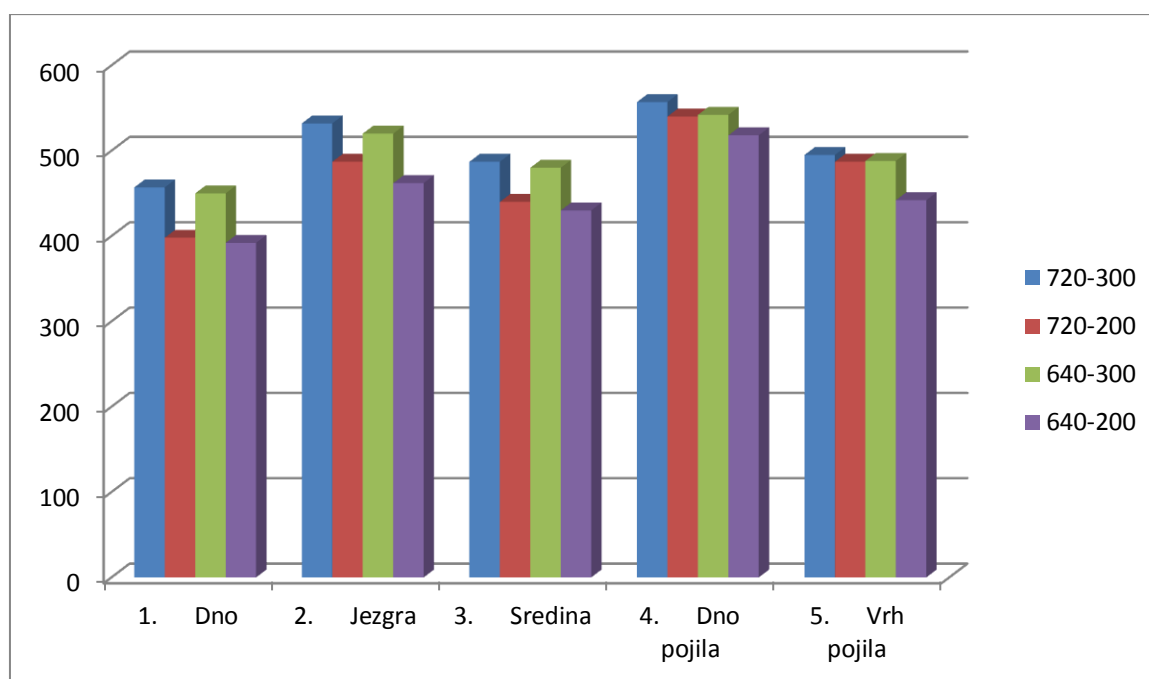
Slika 34. Krivulje temperaturnih promjena u kokili i odljevku, varijanta 720-300

### 9.3 Zagrijavanje kokile

U tablici 2 su prikazane maksimalne temperature karakterističnih dijelova kokile, očitane iz krivulja temperaturnih promjena.

Tablica 2. Maksimalna temperatura kokile, °C

mjesto/varijanta	720-300	720-200	640-300	640-200
1. Dno	457	398	450	392
2. Jezgra	532	487	520	462
3. Sredina	487	440	480	430
4. Dno pojila	557	540	542	518
5. Vrh pojila	495	487	488	442



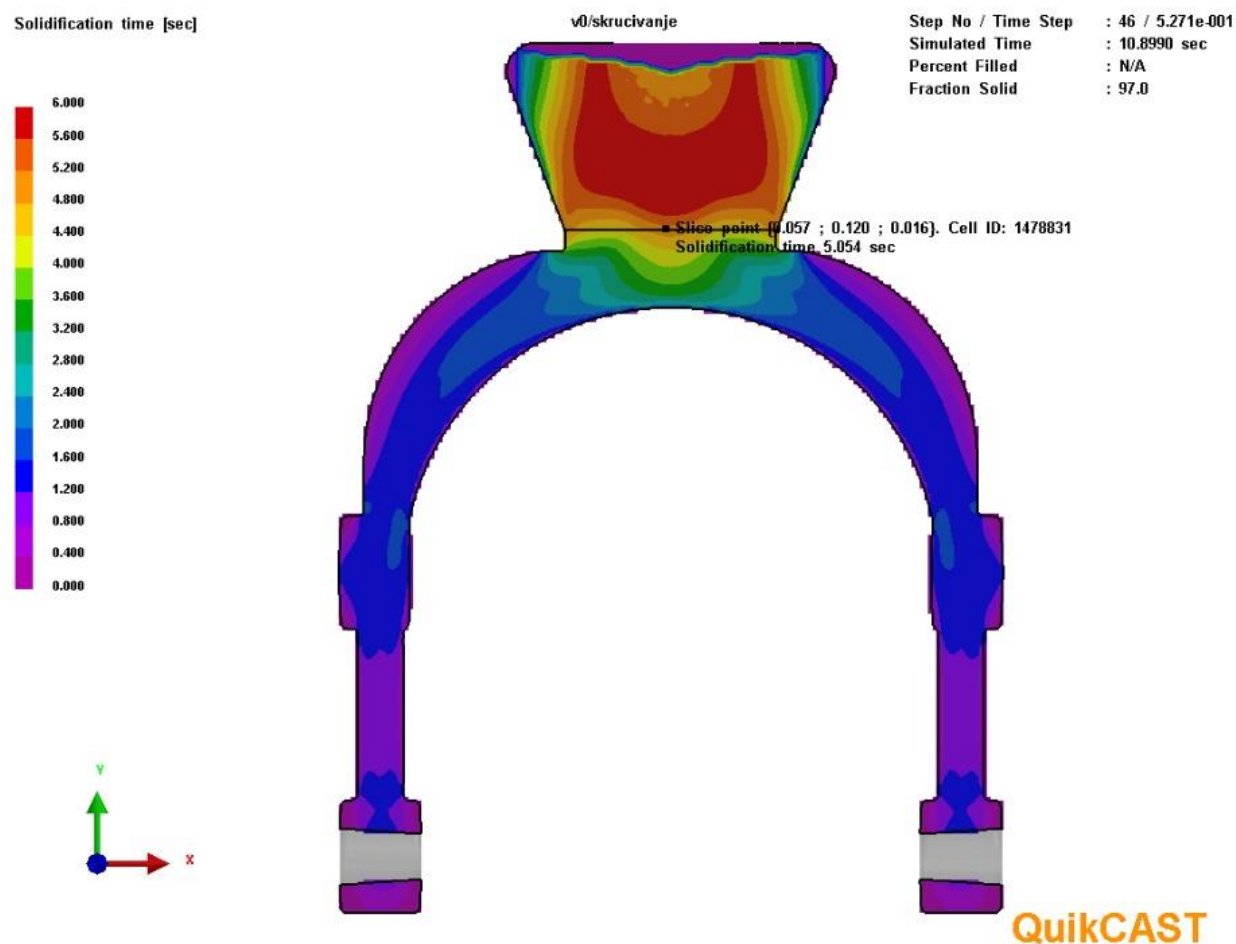
Slika 35. Histogram, maksimalne temperature kokile, °C

Prema rezultatima iz simulacije, prikazanim u histogramu na slici 35, najviše se zagrijava jezgra i kokila pri dnu pojila.



## 9.4 Vrijeme skrućivanja karakterističnih mjesta odljevka

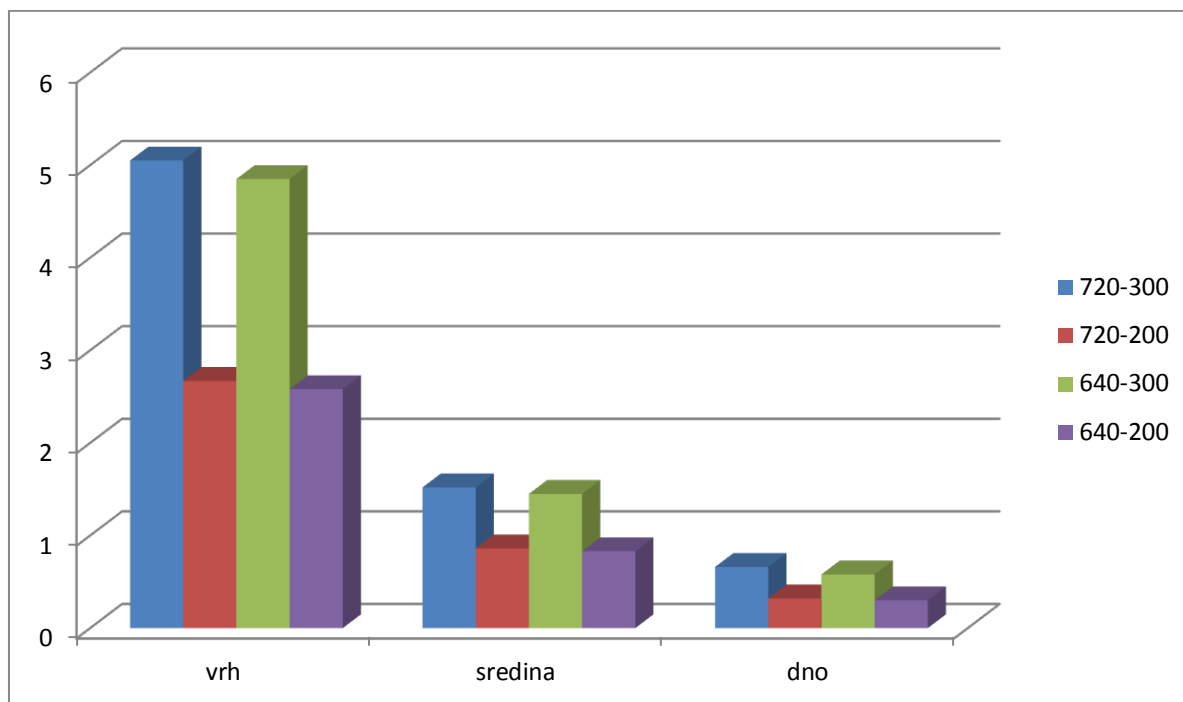
Na slici 36 prikazano je vrijeme skrućivanja sredine odljevka za varijantu 720-300 (v0). U tablici 3, prikazana su vremena skrućivanja karakterističnih mjesta odljevka za četiri kombinacije temperatura odljevka.



Slika 36. Vrijeme skrućivanja odljevka, varijanta 720-300

Tablica 3. Vrijeme skrućivanja karakterističnih mjesta odljevka u sekundama

mjesto/varijanta	720-300	720-200	640-300	640-200
Vrh	5,05	2,67	4,85	2,58
Sredina	1,52	0,86	1,45	0,83
Dno	0,66	0,32	0,58	0,30

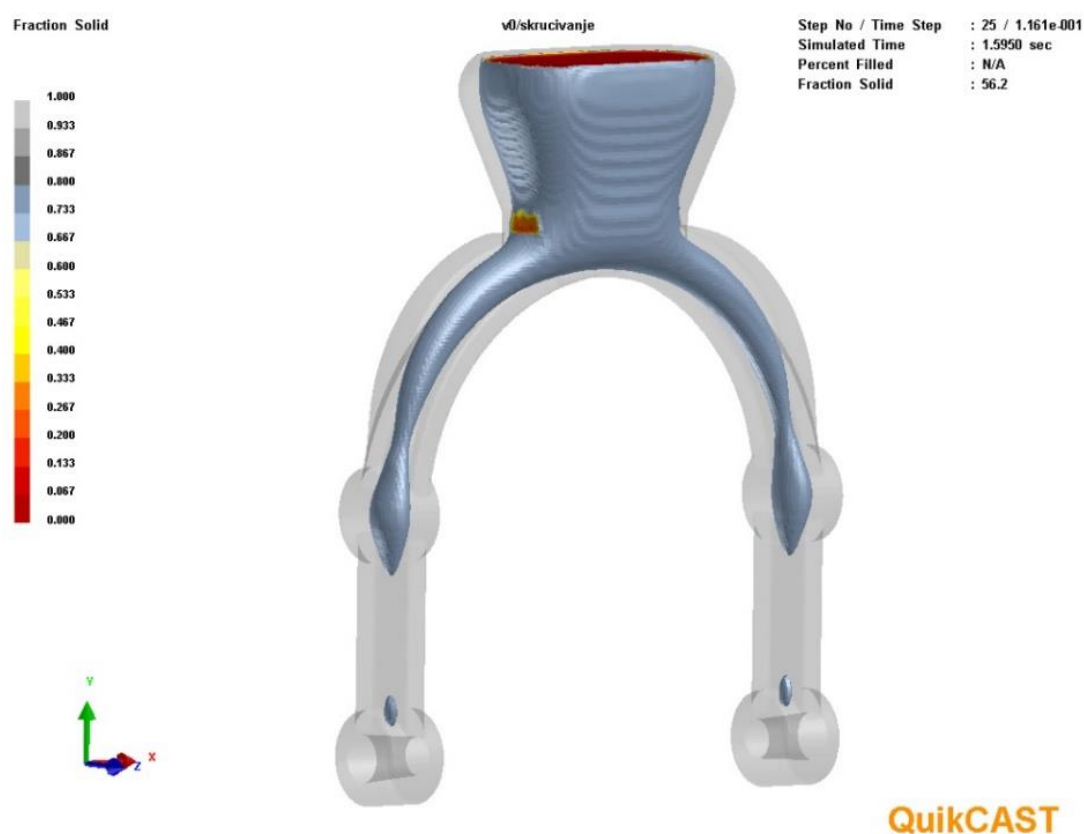


Slika 37. Histogram, vrijeme srćuivanja karakterističnih mjesta u odljevku, s

Analiza vremena skrućivanja, podaci prikazani u histogramu, slika 37. Kod svih varijanti do najbržeg skrućivanja dolazi u predjelu dna vilice, ali uočljiva je razlika da kod predgrianih kalupa na 200 °C dolazi do bržeg skrućivanja u odnosu na kalup predgrijan na 300 °C. Značajna je razlika u skrućivanja vrha vilice između varijanti predgrijanog kalupa na 200 °C u odnosu na 300 °C. Vidljivo je da je skrućivanje upola kraće kod kalupa predgrijanog na 200 °C.

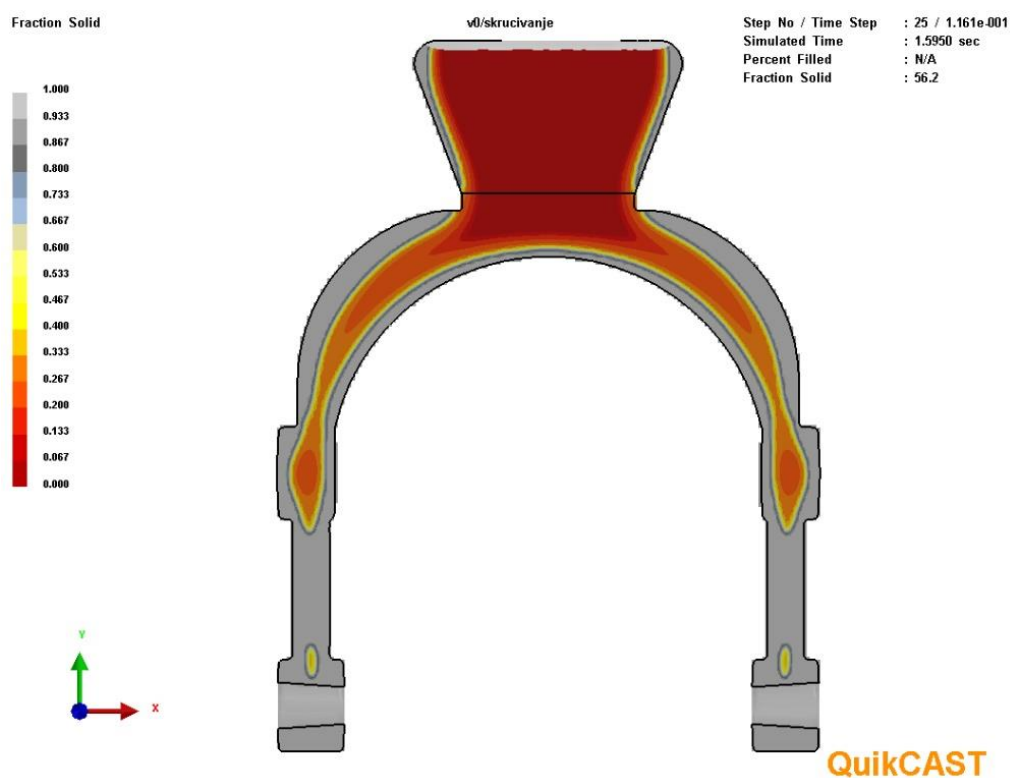
## 9.5 Tijek skrućivanja i pojava poroznosti skrućivanja

Na slici 38 prikazano je usmjereno skrućivanje odljevka od tankih dijelova na dnu prema pojilu na vrhu, za varijantu 720-300. Princip skrućivanja jednak je za sve četiri varijante. Mogu se uočiti četiri mjesta na kojima je došlo do prestanka napajanja, gdje postoji vjerojatnost nastanka poroznosti.

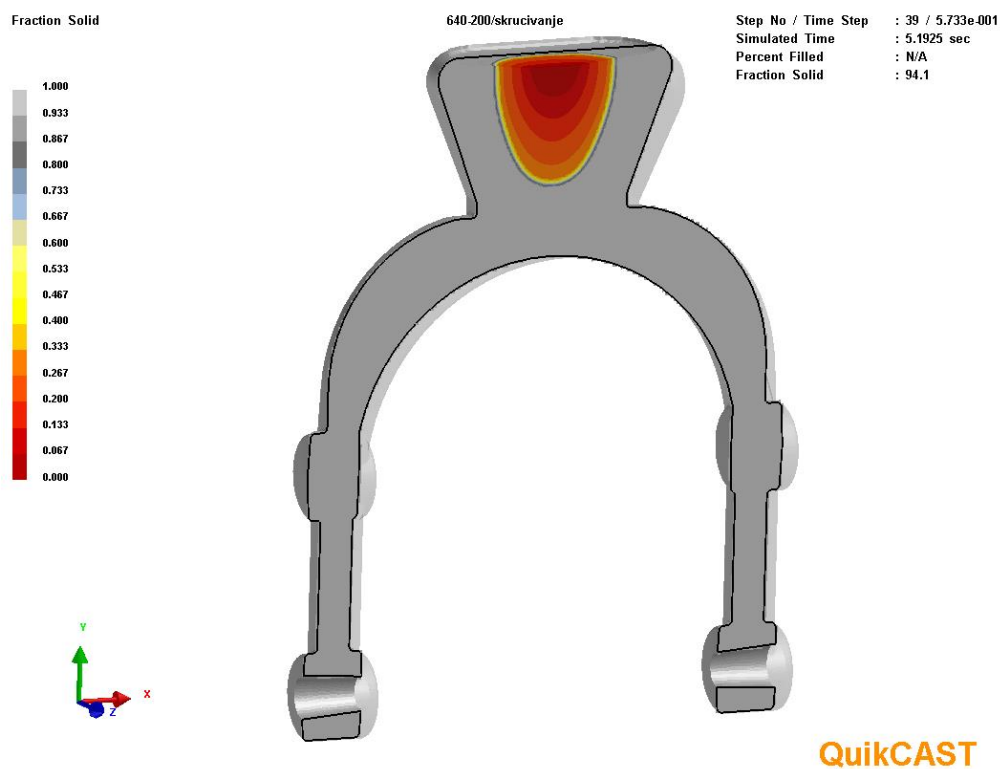


Slika 38. Usmjereno skrućivanje prema pojilu, varijanta 720-300

Na slikama 39 i 40 prikazano je skrućivanje po središnjem presjeku odljevka, kao udio krute faze koji se smanjuje od tanjih prema debljim dijelovima odljevka i prema pojilu.

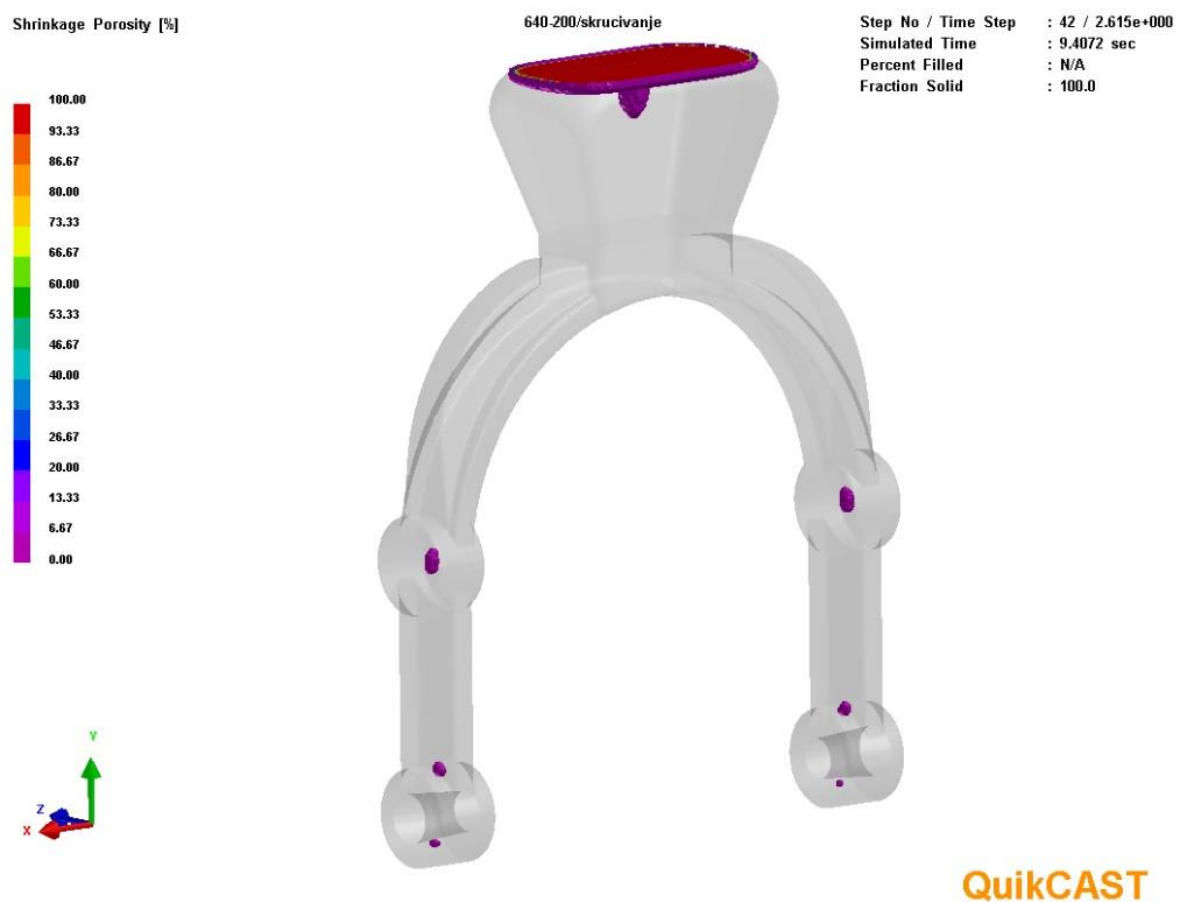


Slika 39. Skrućivanje odljevka, udio krute faze nakon 1,59 s, varijanta 720-300



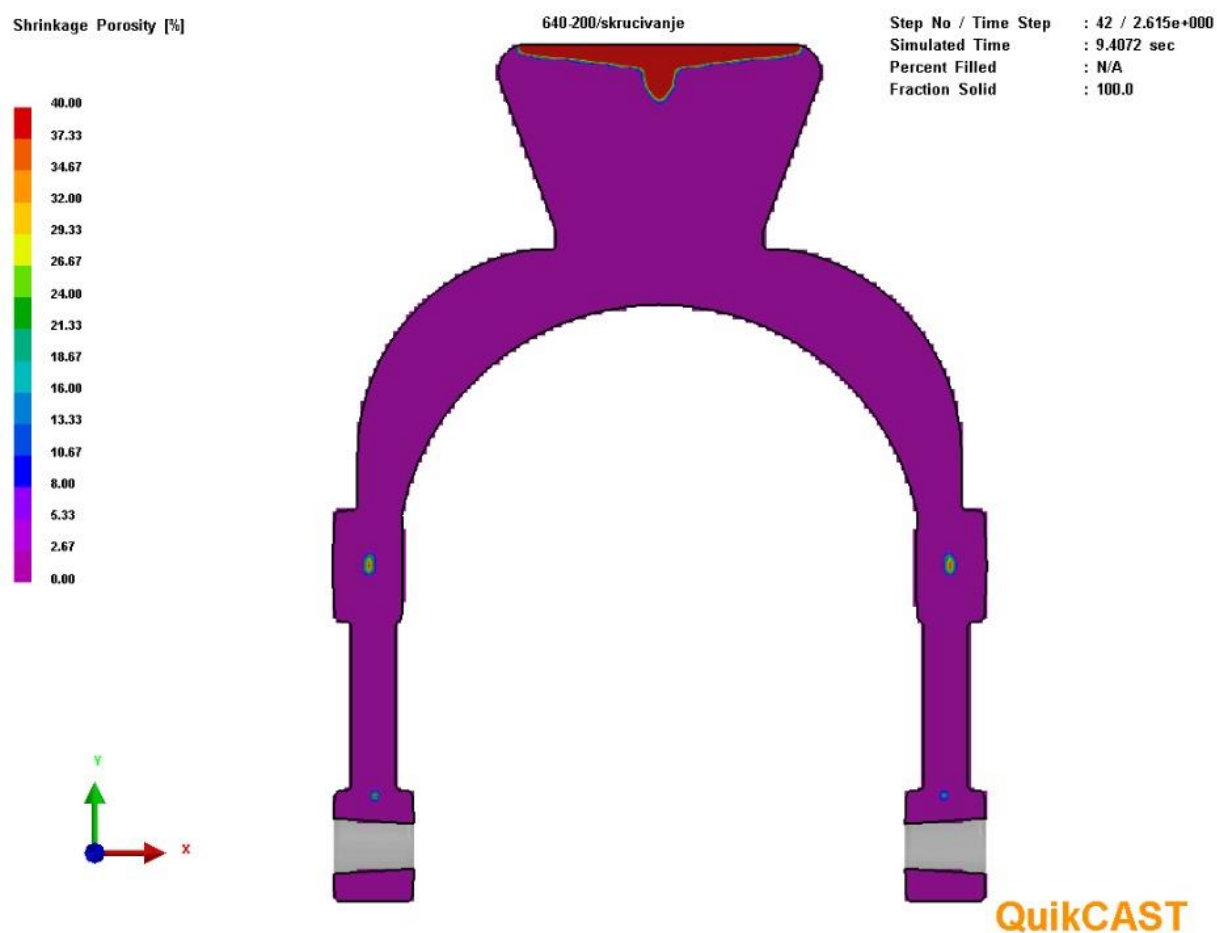
Slika 40. Završetak skrućivanja odljevka, varijanta 640-200

Na slici 41 prikazana su mjesta na kojima je došlo do pojave poroznosti skrućivanja kod varijante s nižom temperaturom ulijevanja i nižom temperaturom kokile, varijanta 640-200.



Slika 41. Mjesta pojave poroznosti skrućivanja, varijanta 640-200

Na slici 42 prikazana je poroznost na poprečnom presjeku odljevka. Iz tog prikaza može se očitati vjerojatnost pojave poroznosti na pojedinom mjestu.

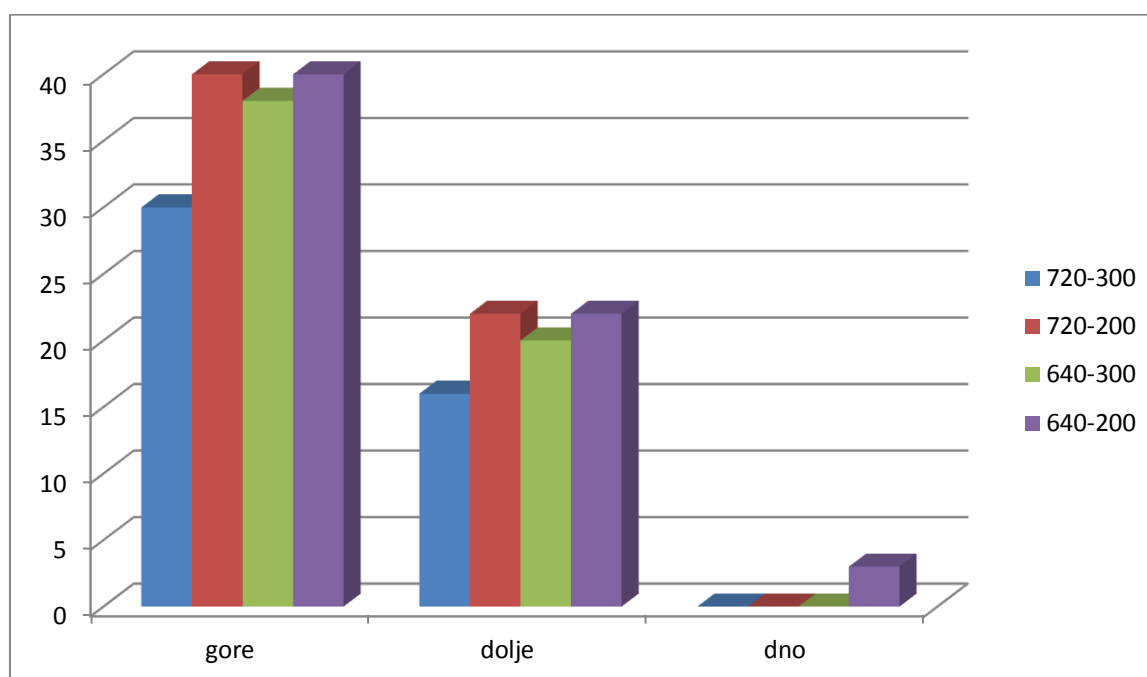


Slika 42. Vjerojatnost pojave poroznosti na mjestima koja posljednja skrućuju, varijanta 640-200

U tablici 4 prikazane su vjerojatnosti pojave poroznosti skrućivanja na mjestima koja zadnja skrućuju za sve četiri varijante temperature ulijevanja i temperature kokile.

Tablica 4. Vjerojatnost poroznosti, %

mjesto/varijanta	720-300	720-200	640-300	640-200
gore	30	40	38	40
dolje	16	22	20	22
dno	0	0	0	3



Slika 43. Histogram, vjerojatnost poroznosti, %

Iz histograma na slici 43 vidljivo je da su najbolji rezultati za topliju kokilu i višu temperaturu lijevanja. Najlošiji rezultati su za hladniju kokilu i nižu temperaturu lijevanja. Na smanjenje poroznosti puno više utječe povećanje temperature kokile od povećanja temperature lijevanja čiji se utjecaj vidi samo kod kokile zagrijane na 300 °C dok se kod kokile zagrijane na 200 °C ne vidi.

## 9.6 Priprema taljevine za lijevanje

Lijevanje je izvršeno u Laboratoriju za ljevarstvo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Slika 44 prikazuje elektrootporna peč za taljenje metala u kojoj je izvršeno taljenje aluminija za lijevanje vilice.



Slika 44. Elektrootporna peč za taljenje



Slika 45. Taljenje aluminijskih ingota



Slika 45 prikazuje aluminijske ingote neposredno prije taljenja. Prije postupka ulijevanja potrebno je kontrolirati temperaturu taljevine prikazano na slici 47 i skinuti trosku s površine taljevine u elektropeći, slika 46.



Slika 46. Skidanje troske s površine taljvine



Slika 47. Mjerenje temperature taljevine

## 9.7 Lijevanje vilice

U nastavku na slikama 48 i 49 prikazan je stroj za lijevanje. Stroj se sastoji od elektrohidrauličkog prigona za zatvaranje i otvaranje polovica kalupa. Desna polovica kalupa je nepomična dok je lijeva pomična. Pomični dio kalupa ostvaruje gibanje pomoću hidrauličkog cilindra.



Slika 48. Kokilni stroj za lijevanje, otvoren kalup



Slika 49. Mehanizam za otvaranje i zatvaranje kokile, zatvoren kalup



Kokila je prije lijevanja tretirana sredstvom za premazivanje kalupa. Korišten je premaz DYOCOTE DBN120. Nanošenje premaza vrši se naštrcavanjem zračnim pištoljem na predgrijanu kokilu. Slika 50 prikazuje pomičnu polovicu kokile tretirane premazom neposredno prije lijevanja. Slika 51 prikazuje nepomičnu polovicu kalupa.



Slika 50. Pomična polovica kokile s jezgrama



Slika 51. Nepomična polovica kokile

Taljevina je prenesena od peći do kokile pomoću uljevnog lonca. Lonac je prethodno predgrijan plinskim plamenom. Prije uljevanja prvo se predgrije kokila pa se nanese premaz, slika 52. Kokila je predgrijana plinskim plamenom na 150 °C. Slika 53 prikazuje uljevanje taljevine u kokilu. Nakon desetak ponovljenih ciklusa lijevanja, kokila je poprimila stabilno temperaturno polje. Uočene su vidljive promjene na odljevcima odlivenim nakon uspostavljanja stabilnog temperaturnog polja kokile i prvim odljevcima iz hladnije kokile.



Slika 52. Nanošenje premaza na kokilu



Slika 53. Ulijevanje taljevine



Slika 54. Otvaranje kokile nakon lijevanja



Slika 55. Vađenje odljevka nakon hlađenja

Nakon uljevanja i hlađenja taljevine, kokila se otvara, prikaz na slici 54. Na slici 55 vidljivo je vađenje odljevka iz kokile.



## 9.8 Rezultati i analiza

### 9.8.1 Vizualna kontrola

Izvršena je vizualna kontrola odljevaka. Prvi odljevak koji je bio lijevan u hladnoj kokili ima nekoliko površinskih nedostataka. Vidljivo je da površina nije glatka, vidljive su površinske linije koje su nastale ubrzanim skrućivanjem što je posljedica hladnog kalupa. Slika 56 prikazuje odljevak nakon prvog lijevanja u relativno hladnom kalupu.



Slika 56. Prvi odljevak, lijevanje u kokilu predgrijanu na 150 °C

Slika 57 prikazuje usporedbu pojila prvog odljevka (dolje) i odljevka nakon desetak ciklusa lijevanja kalupa (gore). Vidljivo je kako je dimenzija uljevnog sustava prvog odljevka (oznaka broj 1) znatno manja od uljevnog sustava odljevka nakon zagrijavanja kokile uslijed lijevanja.



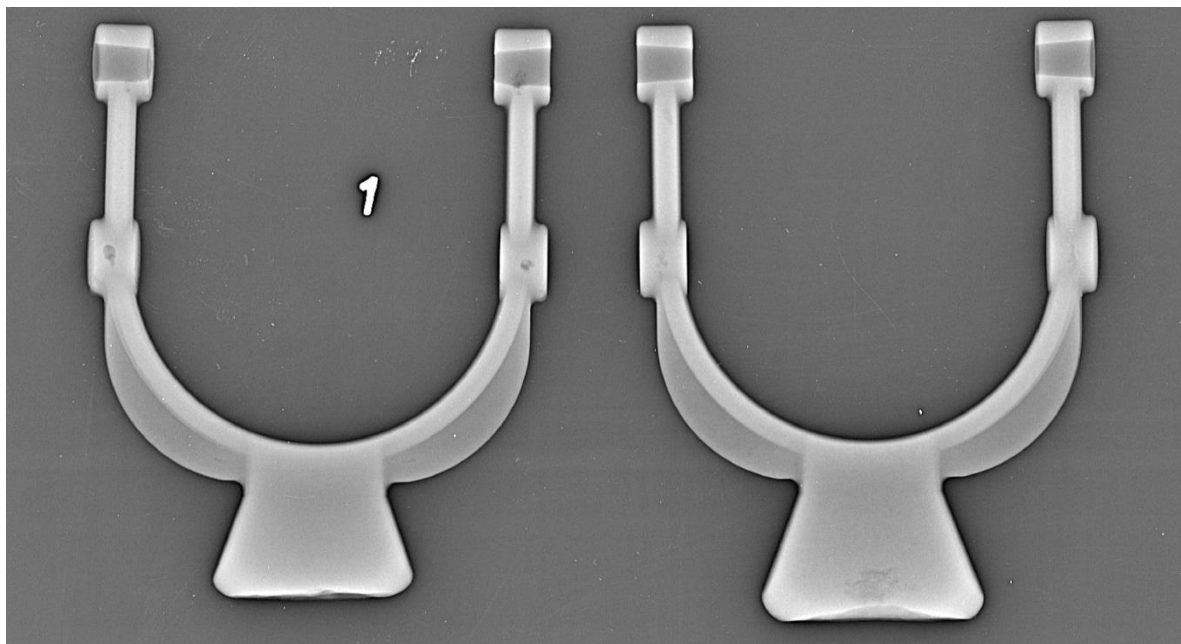
Slika 57. Uljevni sustav

### 9.8.2 Snimanje rendgenom

U svrhu pronalaska poroznosti na odljencima proizvedenim kokilnim lijevom, napravljena je rendgenska snimka odljevaka. Slika 58 prikazuje rendgenski snimak prvog odljevka (lijevo) u hladnijem kalupu te odljevka u toplijem kalupu (desno). Može se uočiti da je prisutna poroznost u oba odljevka.

U prvom odljevku (lijevo) poroznost je izraženija što je posljedica bržeg skrućivanja taline zbog hladnijeg kalupa, slike 58 i 59. Stvarno izvedeno stanje se podudara sa simulacijama gdje je temperatura hladnijeg kalupa iznosila 200 °C, a toplijeg 300°C. Simulacije su pokazale da pojava poriznosti ne ovisi toliko o temperaturi taline koliko ovisi o temperaturi kokile. Kod manje temperature kokile dolazi do bržeg odvođenja topline iz odljavka, posljedica toga je brže skrućivanje te pojava većeg udjela poroznosti.

U odljevku koji je izveden na toplijem kalupu (desno) pojava poroznosti drastično je manja, slike 58 i 59. Može se zaključiti da je u ovom slučaju usporeno odvođenje topline iz odljevka, za što je zaslužna povišena temperatura kokile.



Slika 58. Rendgenska snimka odljevaka



Slika 59. Prvi odljevak- hladniji kalup (lijevo) i topliji kalup (desno)



## 10. ZAKLJUČAK

Konstrukcija metalnih kalupa za postupke kokilnog lijevanja predstavlja značajan konstrukcijski izazov i zahtjeva spoj znanja i stečenih iskustava pri oblikovanju i izradi istih. Prilikom postupka konstruiranja i oblikovanja metalnih kalupa treba biti zadovoljen veliki broj kriterija. Zaključujemo da simulacije za lijevanje postaju moćan alat za predviđanje lokaliteta grešaka, te za eliminaciju istih. Vizualizacija punjenja kalupa, hlađenja i skrućivanja i vizualizacija pojave poroznosti uvelike štedi na vremenu i troškovima.

U eksperimentalnom dijelu rada napravljena je simulacija lijevanja za četiri varijante, gdje su varijante grupirane po kriteriju temperatura lijevanja i temperatura predgrijavanja kokile. Naknadno je izvršeno lijevanje odljevka u Laboratoriju za ljevarstvo te su uspoređeni rezultati iz simulacija u odnosu na stvarni odljevak.

Rezultati simulacija podudaraju se sa stvarnim odljevkom. Rendgenski prikaz odljevka otkriva pojavu poroznosti na dijelovima koji su kritični. Stvarno izvedeno stanje se podudara sa simulacijama gdje je temperatura kalupa bila niža (200 °C). Simulacije su pokazale da pojava poroznosti ne ovisi toliko o temperaturi taline koliko ovisi o temperaturi kokile. Kod manje temperature kokile dolazi do bržeg odvođenja topline iz odljevka, posljedica toga je brže skrućivanje te pojava većeg udjela poroznosti.

## LITERATURA

- [1.] Budić Ivan: Posebni lijevački postupci, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2006
- [2.] Tehnička enciklopedija 6, Zagreb MCMLXXIX, Izdanje i naklada jugoslavenkog leksikografskog zavoda
- [3.] <https://www.lionheartreplicas.co.uk/pewter-and-its-history.aspx>
- [4.] Bonačić Mandinić Z., Budić I.: Osnove tehnologije kalupljenja – jednokratni kalupi 1. Dio, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.
- [5.] Živković D.; “Lijevanje metala“, interna skripta, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Split, 2007.
- [6.] Mehanizacija lijevaonica, Tehnička enciklopedija, Zagreb: JLZ 1963.-2997. Sv. 8. 1980.
- [7.] [http://www.pfri.uniri.hr/~tomic/TMO/TMO%209%20%204\\_4.07.PDF](http://www.pfri.uniri.hr/~tomic/TMO/TMO%209%20%204_4.07.PDF)
- [8.] R.E. Samalman in R.J. Bishop: Modern Physical Metallurgy & Materials Engineering (Sixth Edition), Butterworth-Heinemann ©Reed Educational and Professional Publishing
- [9.] M. Payapong: Solidification Modeling of Iron Casting Using SOLIDCast, Master diss., West Virginia University, 2007.
- [10.] B. Ravi: Casting simulation and Optimization: Benefits, Bottlenecks, and Best Practices, Technical Paper for Indian Foundry Journal, 2008.
- [11.] [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_pro\\_strpj/djelatnici/acukor\\_predavanja/](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_pro_strpj/djelatnici/acukor_predavanja/)
- [12.] Simulacije lijevanja: literatura – Branko Bauer, Predavanja Automatizacija lijevaonica, FSB Zagreb, 2012.